

УДК 669.21/.23(075.8)

## ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

© 2014 г. **А.В. Аксенов, А.А. Васильев, А.А. Швец, В.Н. Охотин**

Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет (НИ ИргТУ)

НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья» («ТОМС»), г. Иркутск

Статья поступила в редакцию 09.10.12 г., доработана 26.04.13 г., подписана в печать 10.06.13 г.

Показана возможность применения ультратонкого измельчения при переработке минерального сырья. Приведены примеры успешного использования данной технологии в области обогащения полиметаллического сырья и гидрометаллургии благородных металлов. Описаны принцип работы бисерной мельницы и ее основные технологические параметры (размер и загрузка мелющей среды, скорость вращения импеллера, плотность пульпы).

**Ключевые слова:** ультратонкий помол, бисерная мельница, мелющая среда, концентрат, атмосферное окисление, крупность материала, флотационное обогащение, цианирование.

A feasibility of ultrafine grinding implementation for mineral raw materials processing is shown. Examples of successful implementation of this technology in beneficiation of polymetallic materials and hydrometallurgy of precious metals are presented in the paper. The principle of operation of bead mill and its main process parameters are described (size and load of grinding bodies, impeller rotation speed, pulp density).

**Key words:** ultrafine grinding, bead mill, grinding medium, concentrate, atmospheric oxidation, material grain size, flotation concentration, cyanidation.

### ВВЕДЕНИЕ

Процессы подготовки минерального сырья к обогащению и металлургической переработке становятся все более адаптированными для упорного, труднообогатимого материала. В современных технологических схемах все чаще можно встретить процессы, применение которых еще совсем недавно считалось делом далекого будущего. Одним из примеров использования такой «прорывной» технологии является все более широкое распространение ультратонкого измельчения (УТИ) минерального сырья.

Внедрение современных измельчающих аппаратов обусловлено пресловутым ухудшением качества минерального сырья и вовлечением в переработку руд со все более тонкой вкрапленностью ценных компонентов. Новые мельницы отчасти вытеснили устаревшие консервативные методы измельчения и

поэтому они чаще всего востребованы в новых точках современных схем.

В настоящей статье приведены технические характеристики и принцип работы бисерных мельниц, используемых для тонкого и ультратонкого помола минерального сырья, представлены примеры их успешного применения в процессах флотационного обогащения и для подготовки сырья к выщелачиванию.

### ОПИСАНИЕ РАБОТЫ МЕЛЬНИЦ

Современные аппараты для тонкого измельчения, в частности вертикальные и горизонтальные бисерные мельницы (рис. 1), пришли в горно-металлургическую отрасль из лакокрасочной промышленности. Все они оборудованы стационарными

**Аксенов А.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов НИ ИргТУ (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83). E-mail: aksenov2008@yandex.ru.

**Васильев А.А.** – канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: vasilhev2008@yandex.ru.

**Охотин В.Н.** – аспирант той же кафедры. E-mail: OhotinVN@yandex.ru.

**Швец А.А.** – ст. науч. сотр. НИИПИ «ТОМС» (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83/1). E-mail: shvets@tomsgroup.ru.

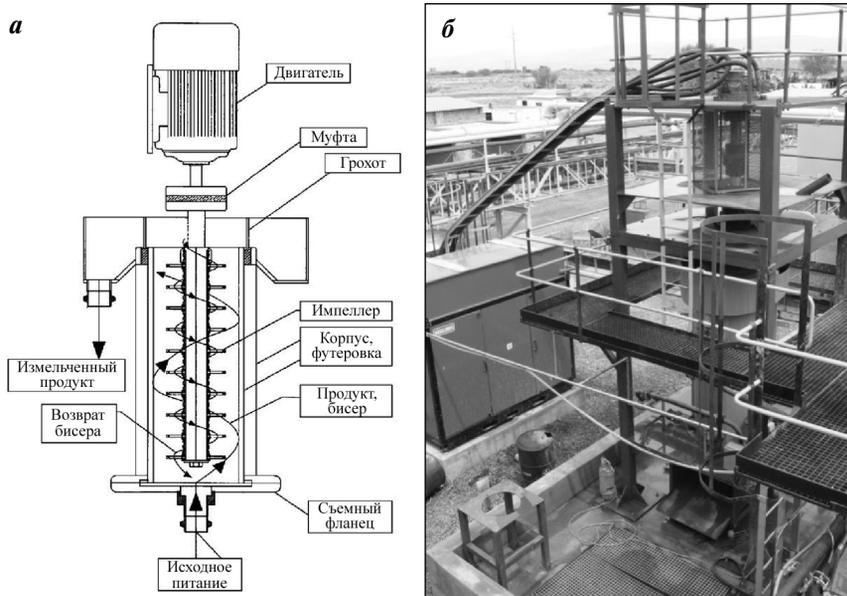


Рис. 1. Схема измельчения в бисерной вертикальной мельнице (а) и ее внешний вид (б)

Таблица 1  
Сравнительные характеристики бисерной и шаровой мельниц

Параметр	Вид мельницы	
	Шаровая	Бисерная
Шаровая загрузка, % от объема мельницы	40	85
Исходная крупность питания, мкм	80 % менее 27	
Продолжительность измельчения, мин	150	0,5
Расход электроэнергии, кВт·ч/т	63,3	14,5
Крупность продукта, мкм	80 % менее 9,8	
Диаметр шаров, мм	3–16	1,0–1,2

камерами помола, в которых применяются мелющие тела малого размера (бисер). Кроме того, внутри мельниц установлены мешалки, вращающиеся с большой скоростью. Принцип действия этих устройств основан на высокоэффективном перемешивании, в результате чего энергия передается небольшим мелющим телам с образованием множества сжатых и быстро вращающихся слоев измельчаемого материала, генерирующих силы сжатия и скручивания.

Данные аппараты отличаются высокой пропускной способностью и большим коэффициентом преобразования энергии, если они используются для тонкого и ультратонкого измельчения. Сравнительный анализ работы бисерной и шаровой мельниц (табл. 1) показал, что использование первой для измельчения материала до крупности ~10 мкм по-

зволяет снизить уровень электропотребления более чем на 75 %, а продолжительность помола в 300 раз меньше по сравнению с традиционной мельницей. Высокая удельная производительность бисерных аппаратов является решающим фактором для выбора данной технологии.

В бисерных мельницах частицы измельчающей среды полностью перемешиваются с высококонцентрированной минеральной пульпой, что сопровождается значительным энергопотреблением. Для получения нужного конечного продукта необходима оптимизация основных технологических параметров, таких как [1]: размер частиц мелющей среды, скорость вращения импеллера мельницы, объем загружаемой измельчающей среды и материал, из которого она изготовлена, плотность пульпы. Это позволит достичь минимального энергопотребления и максимальной производительности мельницы.

Крупность частиц мелющей среды — самая важная характеристика процесса бисерного измельчения. Практика показывает, что наилучшие результаты дости-

гаются, когда размер частиц измельчающей среды в бисерной мельнице в 20–30 раз больше, чем подаваемого продукта. На эффективность измельчения также огромное влияние оказывает материал, из которого изготовлен так называемый бисер. Наиболее часто в этих целях используют материалы на основе керамики, оксидов циркония и гафния.

Так как в основе работы бисерной мельницы лежит центробежная сила, посредством которой энергия передается измельчающей среде для измельчения ею подаваемых частиц продукта, то скорость вращения мешалки имеет большое значение для производительности мельницы: чем она выше, тем меньше время помола, необходимое для получения требуемой крупности частиц.

Отличительной особенностью рассматриваемых аппаратов является высокая загрузка измельчаю-

шей среды (до 85 % от объема мельницы). Ее уровень находится практически в прямой зависимости от передаваемой мощности устройства, что часто используется для расчетов объема измельчающей среды при заданном значении энергии.

Оптимальная плотность подаваемой в бисерную мельницу пульпы обычно варьируется между 40 и 60 %. Поддержание этого показателя в данном диапазоне очень важно, поскольку бисерные аппараты часто имеют ограниченный объем потока [2].

Ниже приведены основные технологические показатели работы бисерной мельницы:

Скорость вращения импеллера, м/с.....	8—12
Расход электроэнергии*, кВт·ч/т.....	3—40
Средний расход бисера, г/т.....	300
Шаровая загрузка, % от объема мельницы.....	до 85
Плотность пульпы, % твердого.....	40—60
Диаметр шаров, мм.....	1—5
Крупность питания мельницы, мкм....	до 150—300

\* Расход электроэнергии определяется физико-механическими свойствами измельчаемого сырья, его начальной и требуемой конечной крупностью.

## ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАТОНКОГО ПОМОЛА ПРИ ФЛОТАЦИОННОМ ОБОГАЩЕНИИ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Долгое время считалось, что применение тонкого и ультратонкого видов измельчения в технологических схемах, включающих флотационное обогащение, нецелесообразно и даже вредно. К наиболее распространенным из указанных в литературе причин негативного действия такого помола можно отнести ошламование материала и химическую активацию минералов, которые, по устойчивому мнению, приводят к снижению селективности разделения минералов. Однако многолетний опыт исследований в области тонкого измельчения и флотационного обогащения минерального сырья позволяет утверждать о неоднозначности сделанных ранее выводов.

Ниже описаны практические примеры позитивного и негативного применений процессов тонкого помола в схемах флотационного обогащения для различных видов минерального сырья: медно-цинковых, медно-колчеданных, свинцово-цинковых, золотосвинцовых и других золотосодержащих руд.

Ограничивающим фактором использования УТИ в обогащении может являться химическая активация минералов. В частности, при обогащении медно-цинковых руд, в которых наблюдается тонкое взаимное прораствание медных и цинковых минералов (халькопирита и сфалерита), часто применяется схема коллективной флотации, целью которой является получение черного флотационного концентрата с максимально полным извлечением в него ценных компонентов при относительно грубом помолу. При ультратонком измельчении такого концентрата, за счет увеличения удельной поверхности минералов, значительно возрастает концентрация ионов меди в жидкой фазе пульпы, что приводит к активации сфалерита. Следствием этого являются снижение селективности флотации и загрязнение медного концентрата цинком.

При обогащении большинства других руд цветных металлов отрицательного влияния УТИ обычно не наблюдается. Напротив, тонкий помол приводит к вскрытию минералов и последующему улучшению технологических показателей их разделения.

Так, при флотационном обогащении упорных медно-колчеданных руд часто возникает проблема получения кондиционного медного концентрата. Доизмельчение черного концентрата флотации в шаровой мельнице не обеспечивает достаточного вскрытия материала перед перечистными операциями, а УТИ позволяет получать медный концентрат с содержанием меди 20 % и более.

Один из примеров успешного использования ультратонкого помола на стадии флотационного обогащения свинцово-цинкового сырья показан на рис. 2 и в табл. 2. Из приведенных данных следует, что применение доизмельчения позволяет повысить извлечение свинца и цинка в соответствующие концентраты на 11 и 24 %.

Другим примером является использование УТИ для измельчения крайне упорного пиритного продукта, получаемого после контрольной золотосвинцовой флотации полиметаллической руды, переработка которого ранее представлялась экономически нецелесообразной. В настоящее время с применением его ультратонкого помола до крупности 85 % менее 20 мкм и последующего гравитационного обогащения возможно выделение большей части золота (73,4 %) в концентрат, поддающийся дальнейшей гидрометаллургической обработке. Данная схема в настоящее время реализована на действующем предприятии (месторождение «Ново-

Таблица 2

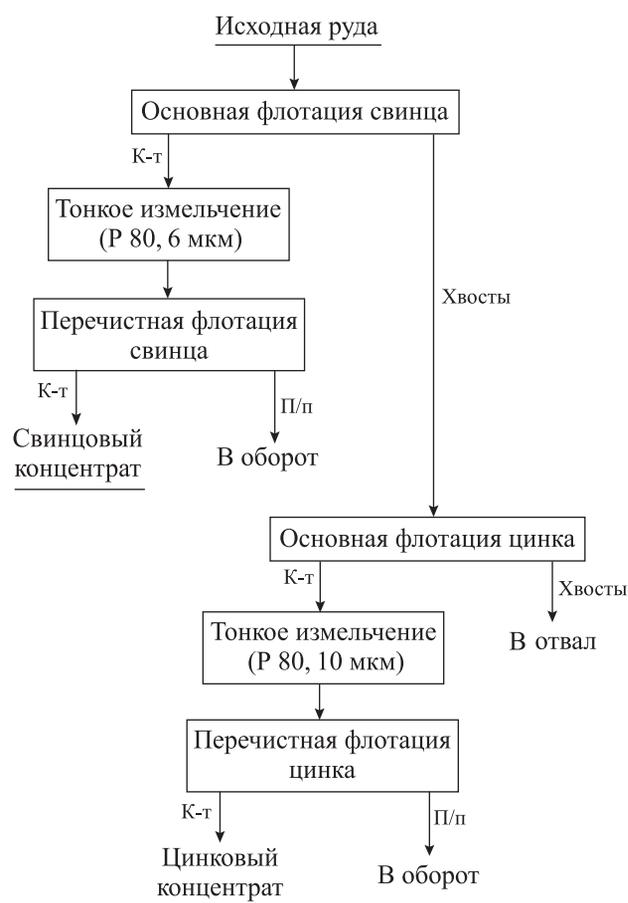
**Результаты применения ультратонкого помола на стадии перечистки флотационных концентратов**

Наименование продукта	Крупность продукта		Извлечение ценного компонента на стадии перечистки, %	
	Исходная	После УТИ	Исходная крупность продукта	После УТИ
Первичный свинцовый концентрат (крупность галенита 4–7 мкм)	90 % –74 мкм	80 % < 6 мкм	68,3	79,6
Первичный цинковый концентрат (крупность сфалерита 10–15 мкм)	93 % –75 мкм	80 % < 10 мкм	62,0	86,4

Таблица 3

**Сводные показатели по обогащению золотосодержащей руды (Хабаровский кр.)**

Схема	Измельчение	Содержание золота, г/т		Извлечение Au, %
		в концентрате	в хвостах	
Гравитационно-флотационное обогащение с измельчением до 80 % менее 30 мкм	В шаровой мельнице	95,6	0,74	87,6
Двухстадийное гравитационно-флотационное обогащение с измельчением до конечной крупности 80 % менее 17 мкм	Комбинированное (шаровое и бисерное)	78,2	0,35	94,1



**Рис. 2.** Схема, включающая операцию ультратонкого помола при флотационном обогащении свинцово-цинковой руды месторождения «Озерное»

Широкинское») производительностью 500 тыс. т руды в год.

При флотации золотосодержащих руд крупность помола часто играет решающую роль при выборе технологии. Так, по результатам исследований руды одного из месторождений Хабаровского края было выявлено, что использование мельниц УТИ для доизмельчения руды до конечной крупности 80 % менее 17 мкм может быть экономически выгодным, так как позволяет повысить уровень извлечения золота на 6–7 % (табл. 3) при незначительном увеличении выхода концентрата (на 1,5 %).

## ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАТОНКОГО ПОМОЛА В ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

В металлургических процессах ультратонкое измельчение может использоваться непосредственно перед стадией агитационного выщелачивания. В ряде случаев при механическом разрушении структуры минералов может наблюдаться сильная механохимическая активация материала (изменение его химических и физических свойств). Данное явление может оказывать двойное воздействие на эффективность последующих операций переработки. С одной стороны, минеральное сырье после УТИ легче поддается разложению, с другой — происходит увеличение сорбционной активности ма-

Таблица 4  
**Результаты применения ультратонкого помола и атмосферного окисления перед стадией цианирования золотосодержащего флотационного концентрата**

Режим	Крупность материала, мкм	Продолжительность выщелачивания, ч	Извлечение ценного компонента, %
Без применения доизмельчения	90 % менее 45	24	72,2
Ультратонкий помол и атмосферное окисление	90 % менее 5	8	93,9

Таблица 5  
**Результаты применения ультратонкого помола перед стадией автоклавного окисления золотосодержащего флотационного концентрата**

Режим	Крупность материала, мкм	Давление в автоклаве, атм	Температура автоклавного разложения, °С	Продолжительность окисления, ч	Извлечение Au при цианировании, %
Без применения доизмельчения	85 % менее 45	20	190	2,5	95,73
Ультратонкий помол	90 % менее 5	5	115	2	95,69

териала, его ошламование и химическая депрессия извлекаемого компонента. В связи с этим применение УТИ может потребовать дополнительных операций перед стадией гидрометаллургии, таких как известкование или атмосферное окисление [3]. При использовании данного сочетания процессов (табл. 4) достигаются существенный прирост извлечения металлов (в ряде случаев до 20–25 %) и значительное сокращение продолжительности выщелачивания за счет практически полного вскрытия ценных компонентов и увеличения площади свободной поверхности растворяемого компонента.

Наиболее благоприятным является сочетание ультратонкого измельчения с последующей окислительной технологией (табл. 5), что позволяет значительно снизить температуру, давление и продолжительность процесса. Это приводит к сокращению капитальных и эксплуатационных затрат на стадии разложения. В перспективе данное сочетание процессов может применяться при производстве меди, цинка, никеля и других цветных металлов, что позволит вовлекать в переработку относительно бедное сырье, извлечение металлов из которого ранее считалось нецелесообразным по причине высоких эксплуатационных затрат. В ряде случаев использование УТИ в сочетании с автоклавным выщелачиванием может заменить высокотратные пирометаллургические технологии получения цветных металлов.

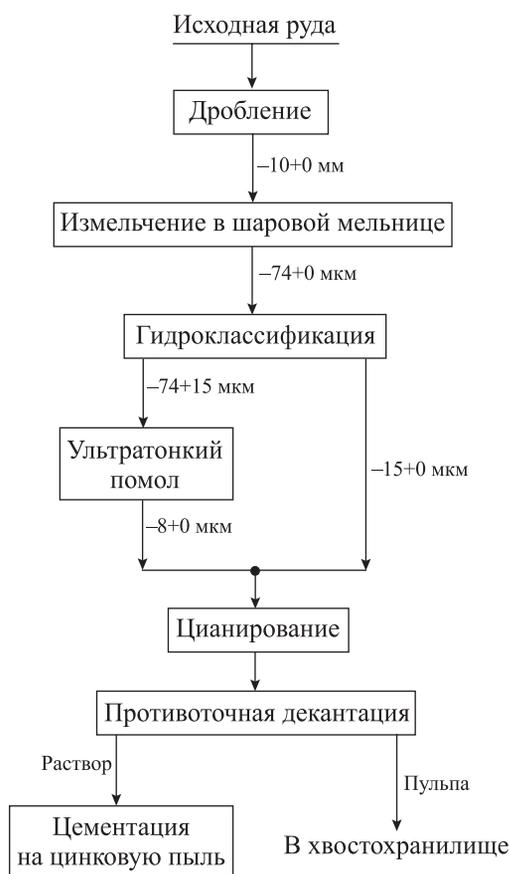


Рис. 3. Технологическая схема переработки исходной руды на комбинате «Etigumus»

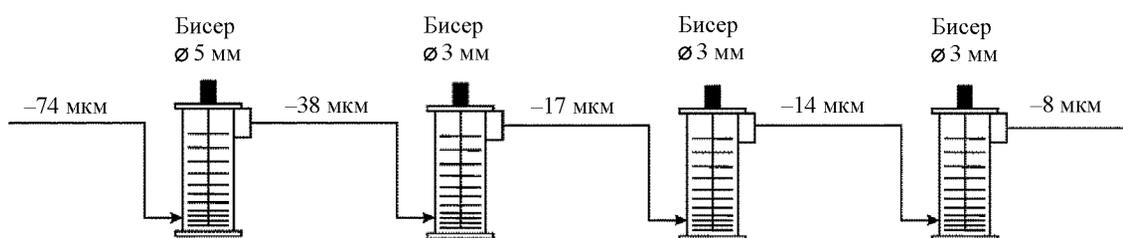


Рис. 4. Схема ультратонкого помола исходной руды

Одним из примеров промышленного использования ультратонкого помола перед стадией выщелачивания является переработка Ag-содержащих руд на горно-обогатительном комбинате «Etigimus» в Турции, который имеет производительность по серебру 450 т/год, или по руде 4,0 млн т/год. На предприятии перерабатываются руды, содержащие 180 г<sub>Ag</sub>/т, и лежалые хвосты с 90 г<sub>Ag</sub>/т. Основными носителями серебра в рудах являются такие минералы, как ялпаит ( $\text{Cu}_2\text{S}\cdot 3\text{Ag}_2\text{S}$ ), аргентит ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) и пираргирит ( $\text{Ag}_2\text{SbS}_3$ ). Твердость руды по шкале Мооса составляет 8,0 ед.

Технологическая схема переработки исходной руды на фабрике «Etigimus» представлена на рис. 3. Ее измельчение в шаровых аппаратах производится в трех независимых секциях, каждая из которых состоит из двух мельниц, работающих последовательно. Первая из них работает в открытом цикле, а вторая — в замкнутом, с гидроциклонами. Ультратонкое измельчение руды проводят в 48 бисерных мельницах, при этом еще 3 аппарата находятся в резерве на случай проведения ремонтных работ. Измельчение осуществляют в 4 стадии в 12 независимых производственных линиях. На рис. 4 приведена схема работы одной производственной линии УТИ с указанием крупности материала после каждой стадии помола и размера используемого бисера.

Затраты электроэнергии на 1 т измельчаемого материала составляют 62,5 кВт·ч/т, расход бисера — 0,21 кг/т. За счет подаваемой в процесс энергии происходит значительный нагрев пульпы: ее температура после УТИ в летний период составляет 70 °С, в зимний — 40 °С. Техническое обслуживание мельниц осуществляется следующим образом: 1 раз в месяц производится их осмотр; 1 раз в квартал осуществляется замена активаторов на импеллеры; 1 раз в полгода меняется футеровка мельницы.

Измельчение лежалых хвостов на комбинате «Etigimus» проводят в цианистой среде в 30 бисерных мельницах (10 производственных линий по

3 стадии измельчения) в полунепрерывном режиме. Исходные хвосты из агитационного чана через распределитель поступают в бисерные мельницы, где измельчаются до крупности —15 мкм. Затем хвосты возвращаются в агитационный чан, откуда вновь направляются на измельчение. После этого материал имеет крупность —5 мкм и подается на стадию агитационного выщелачивания, а на измельчение поступает новая порция хвостов. Продолжительность всего цикла составляет 2 ч.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ультратонкого измельчения расширяет области эффективного использования процессов обогащения и гидрометаллургии. Это позволяет вовлечь в эксплуатацию труднообогатимые руды, переработка которых ранее считалась малоперспективной и экономически нецелесообразной. Новые технологии позволяют повысить уровень извлечения ценных компонентов. Комбинированные гидрометаллургические технологии с применением ультратонкого помола в определенных случаях являются более рентабельной альтернативой традиционным окислительным процессам (обжиг, автоклавное и бактериальное окисления). В отдельных случаях использование ультратонкого измельчения позволяет решать задачи, которые ранее в принципе не могли быть решены без использования радикальных энерго- и капиталоемких процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А.А., Сенченко А.Е., Аксенов А.В. // Вест. ИрГТУ. 2010. № 1. С. 135—137.
2. Nessel J., Radziszewski P., Hardie C., Leroux D. Assessing the performance and efficiency of fine grinding technologies. Canada, Ottawa: CMP, 2006.
3. Vasiliev A.A., Senchenko A.E., Aksenov A.V. // XXVI Intern. Mineral Processing Congr. «IMPC 2012» (New Delhi, India, 24—28 Sept. 2012). P. 4851—4856.