

УДК 622.7 (001)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ КОНУСНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Осипов Д.А., Филиппов В.Е.

*ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук» Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, e-mail: Brelick@list.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований по детализации трансформации форм ковких частиц в процессе помола на принципиально новой лабораторной модели конусной мельницы ударного действия для измельчения золотосодержащих руд с дополнительной функцией изометризации частиц золота. В качестве имитаторов золота использовались свинцовые маркеры разной конфигурации. Особенность разработанной конструкции мельницы заключается в том, что рабочая камера мельницы по ходу измельчения состоит из двух последовательных зон. В первой, нисходящей удлиненной зоне, образованной конусообразным ротором и внутренней поверхностью корпуса мельницы, создаются условия для интенсивных динамических контактов частиц руды с рабочими органами и друг с другом. Во второй, нижней зоне – зоне свободной дезинтеграции частиц друг с другом и с активационным плечом – интенсивная деформация ковких частиц компонентов руды (золота) происходит потоком мелкообломочного материала и перекачиванием их вдоль поверхности в нижней части внешнего ротора. В результате экспериментальных исследований по измельчению рудного материала крупностью фракции 5 мм с имитаторами свободного золота в виде частиц свинца на лабораторной модели конусной мельницы установлено, что высокая степень измельчения и изометризации ковких частиц достигается при максимальной загрузке рабочей зоны измельчаемым материалом (30 кг/ч). Мелкие частицы золота при попадании в нижнюю зону мельницы начинают набирать толщину по краям и стремятся к форме сфероида. Установлено, что изометризации (комкованию) подвергаются все частицы свинца и золота в диапазоне крупности 0,5–3 мм. Обработанные частицы свинцовых маркеров в мельнице имеют высокую степень извлечения, поскольку основным технологическим свойством золота при извлечении гравитационным способом является гидравлическая крупность.

Ключевые слова: центробежная мельница, измельчение, раскрытие, золото, центробежная мельница, свинцовые маркеры, степень измельчения, сухое обогащение, дробление

CENTRIFUGAL DOUBLE STAGE CONE MILL

Osipov D.A., Filippov V.E.

*Federal Research Center «Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences» Institute of Mining of the North. N.V. Chersky
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: Brelick@list.ru*

The results of experimental studies on the detailing of the transformation of forms of malleable particles during grinding on a fundamentally new laboratory model of a cone impact mill for grinding gold-bearing ores with an additional function of isometrization of gold particles are presented. Lead markers of various configurations were used as gold imitators. The peculiarity of the developed design of the mill is that the working chamber of the mill in the course of grinding consists of two successive zones, where in the first descending elongated zone formed by a cone-shaped rotor and the inner surface of the mill body, conditions are created for intensive dynamic contacts of ore particles with working bodies and with each other. friend. In the second, lower zone, there is a zone of free disintegration of particles with each other and with an activation shoulder, where the malleable particles of the ore (gold) components are intensively deformed by the flow of fine-grained material and rolling along the surface in the lower part of the outer rotor. As a result of experimental studies on the grinding of ore material with a fraction size of -5 mm with simulants of free gold in the form of lead particles on a laboratory model of a cone mill, it was found that a high degree of grinding and isometrization of malleable particles is achieved at a maximum load of the working zone with crushed material (30 kg/h). Fine gold particles, when they enter the lower zone of the mill, begin to gain thickness at the edges and tend to the shape of a spheroid. It has been established that all particles of lead and gold in the size range (0.5–3 mm) are subjected to isometrization (lumping). The processed particles of lead markers in the mill have a high degree of recovery, because. The main technological property of gold during their extraction by the gravitational method is the hydraulic fineness.

Keywords: centrifugal mill, grinding, opening, gold, centrifugal mill, lead markers, grinding degree, dry concentration, crushing

Процессы дезинтеграции руд в мельницах различного типа как наиболее затратные в обогащении золотосодержащих руд всегда требовали новых подходов и решений. Одной из основных проблем сухого обогащения золотосодержащих руд на модульных комплексах является измельчение руд [1, 2],

где у мельниц очень низкий КПД, не более 1–2%. Эффективность модульных комплексов сухого обогащения золотосодержащих руд во многом зависит от совершенствования технологии подготовки сырья, в частности измельчительных установок. Чтобы повысить эффективность дезинтеграции руд

в мельницах, совершенствуются все элементы установок (привод, система смазки, электродвигатели, размер мелющих тел, наполненность барабана, скорость вращения), так как сокращение расходов даже на доли процента дает внушительный экономический эффект [3]. При подготовке сырья для последующего извлечения золота необходимо учитывать технико-экономические показатели измельчительных машин, но также одним из основных факторов эффективности измельчения является сохранность полезного компонента с учетом характера воздействия рабочих элементов аппаратов определенного типа на полезные компоненты руды. Данное явление играет значимую роль в дальнейшем технологическом процессе обогащения.

В лаборатории ОПИ ИГДС СО РАН разработана центробежная двухступенчатая мельница с возможностью обеспечить сохранность свободных и раскрытых частиц ковких материалов [4].

Цель исследования – разработать конструкцию конусной мельницы с дополнительной функцией изометризации частиц золота для последующего сухого обогащения. На основе экспериментальных исследований показать поведение частиц измельчаемого материала в процессе их дезинтеграции в конусной мельнице.

Материал и методы исследования

На основе результатов проведенных ранее исследований особенностей разру-

шения частиц золота в процессе измельчения в центробежных и шаровых мельницах [5] была разработана конусная мельница с двухзональной рабочей камерой. Первая (верхняя) часть рабочей полости мельницы состоит из двух противоположно вращающихся рабочих органов конусообразной формы, где в полости межконусного пространства образуется рабочая зона измельчения частиц. Рабочие органы имеют конусную форму с большим углом наклона: внешний конус выполнен с углом наклона 85° , а внутренний конус – с углом наклона 80° . Вторая (нижняя) часть мельницы является зоной разрушения и изометризации ковких частиц, где реализуется интенсивное окомкование полезных компонентов руды (золота).

Центробежная конусная мельница (рис. 1) состоит из герметичного разборного корпуса с верхним загрузочным и нижним разгрузочным отверстиями. Внутри корпуса установлены внешний и внутренний рабочие органы в виде вращающихся роторов с ребрами, расположенными вдоль рабочего органа по всей длине. На верхнем основании внутреннего рабочего органа расположены разгонные радиальные ребрышки. Нижняя часть рабочей камеры имеет вид ступенчатой формы. Зазор между конусными поверхностями рабочих органов образует рабочую камеру. Роторы вращаются в противоположные стороны, при этом скорость вращения внешнего корпуса меньше скорости вращения внутреннего дробящего конуса.

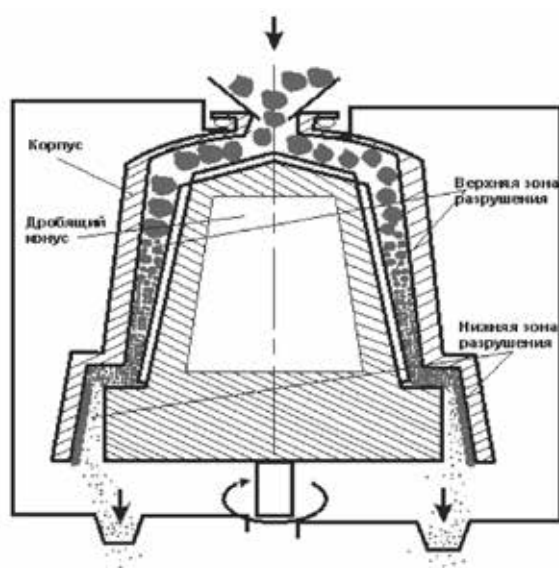


Рис. 1. Схема конструкции конусной дробилки, общий вид лабораторной модели

Исходный материал подается на верхнее основание вращающегося внутреннего дробящего конуса, где куски материала при помощи радиально расположенных разгонных ребер нагнетаются в рабочую камеру. За счет центробежной силы материал прижимается к верхнему корпусу и заполняет камеру. Куски породы, прижатые к внутреннему рабочему органу, вращаются при помощи продольных ребер вместе с ним, т.е. в сторону, противоположную вращению внешнего корпуса и прижатого к нему центробежными силами материала.

Экспериментальные исследования на опытном образце мельницы проводились в лабораторных условиях с исходной крупностью кварцевой руды 5 мм, с использованием в качестве имитаторов частиц золота частиц свинца – маркеров – разной конфигурации и параметров. Применение таких маркеров, обладающих свойством сохранения памяти в виде деформаций формы, позволяет определить интенсивность динамических контактов, т.е. количество и величину механических воздействий, а также зафиксировать характер и направление перемещения потоков внутри рабочей зоны дробления и измельчения.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе экспериментальных работ по изучению эффективности измельчения конусной мельницы было подтверждено, что эффективное разрушение геоматериалов происходит при максимальной загрузке мельницы, где на первой рабочей камере образуется плотная зона разрушения кусков друг с другом.

Определение гранулометрического состава продуктов измельчения геоматериала на конусной мельнице с дополнительной функцией изометризации частиц золота производилось посредством ситового анализа по классам крупности: $-4+3$ мм; $-3+2$ мм; $-2+1,65$ мм; $-1,6+1$ мм; $-1+0,63$ мм; $-0,63+0,315$ мм; $-0,315+0,1$ мм; $-0,1+0,063$ мм; $-0,063$ мм. Результаты гранулометрического анализа состава измельченного материала для разного значения дебита измельчаемого материала представлены на рисунке 2.

Степень измельчения в принятых значениях дебита (производительности) составляет: для 15 кг/ч – 3,2; для 20 кг/ч – 3,8. Наибольшая степень измельчения достигается при производительности 30 кг/ч – 5,3, т.е. при максимальной загруженности лабораторной установки.

В режиме подачи материала более 60% от максимально возможной загрузки (30 кг/ч) обломки руды постепенно переполняют рабочую полость мельницы. При этом образуются два основных слоя материала (1 и 2), перемещающихся круговым движением в противоположных направлениях (рис. 3) вследствие противоположного вращения внешнего и нижнего рабочих органов. Слой 1 зафиксирован центробежной силой к внешней стенке рабочей полости мельницы и в соответствии с этим движется по ходу вращения верхнего корпуса. Частицы, примыкающие к внутренней стенке 6 рабочей полости, прижатые продольными ребрами 5, движутся по ходу вращения нижнего ротора, т.е. в обратную сторону относительно слоя, «прикрепленного» к стенке верхнего ротора ребрами и силой трения.



Рис. 2. Динамика изменения гранулометрического состава продуктов измельчения в зависимости от производительности лабораторного образца конусной мельницы

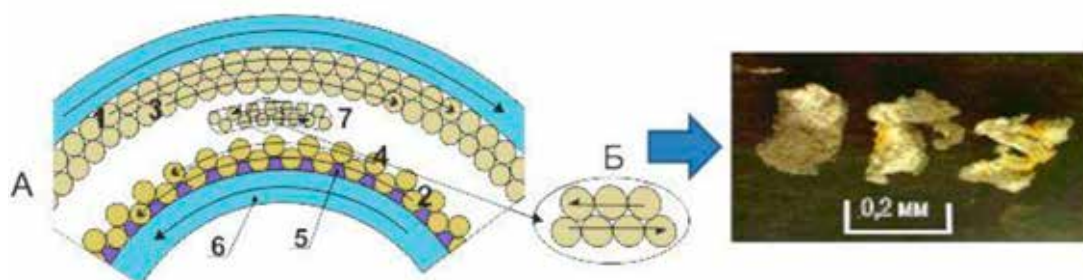


Рис. 3. Два противоположных слоя материала на верхней зоне рабочей полости

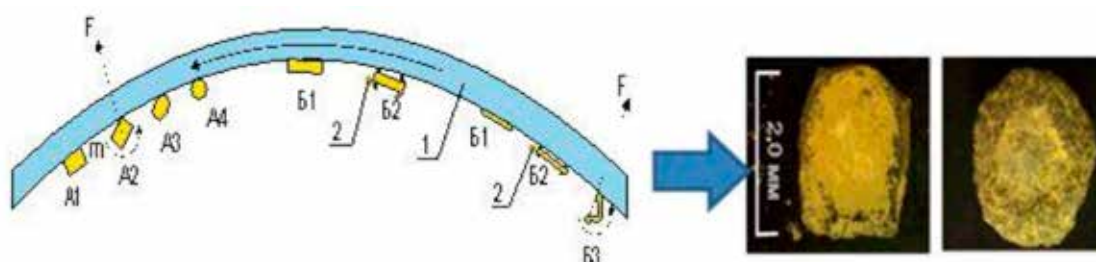


Рис. 4. Схема последовательности формирования различных видов деформации маркеров в нижней части рабочей камеры конусной мельницы

Каждый из основных слоев имеет прилегающие к ним слои 3 и 4, которые вовлечены в движение по направлению движения «крайних» слоев 1 и 2. За счет плотного контакта разнонаправленно движущихся частиц геоматериала образуется зона интенсивного разрушения 7.

Вместе с тем частицы маркеров в зависимости от загруженности рабочей полости установки претерпевают разные виды деформации. Методом бинокулярного изучения были выявлены следующие виды деформаций свинцовых маркеров. Наиболее крупные частицы (от 2 до 3 мм) при режиме подачи материала более 60% от максимальной возможной загрузки в большинстве случаев приобретают вид плотных сфероидов.

В рабочей зоне нижней части мельницы интенсивность изометризации существенно увеличивается за счет частичной разрядки стесненных условий работы измельчителя и дополнительного плеча активатора на нижней части внутреннего рабочего органа, которая сбрасывает частицы на поверхность против вращающегося внешнего корпуса. При этом основная масса легкого измельченного рудного материала за счет потери инерции и в результате упругих динамических контактов выводится из рабочей зоны. Таким путем на поверхности нижней части внешнего рабочего органа

создается более разряженная обстановка, где и происходит изометризация тяжелых ковких частиц – имитаторов золота.

Особенность деформации ковких частиц в процессе измельчения обусловлена разностью скоростей перемещения частиц измельчаемой породы и свинцовых маркеров. Установлено, что при обработке частиц мелкообломочным материалом деформированию преимущественно подвергаются те участки поверхности ковких материалов, которые имеют наименьший радиус кривизны. В этом плане очень характерной является динамика деформации частиц пластинчатой формы, представленной на рисунке 4. Через некоторое время обработки края пластины приобретают определенную форму тора. Пластина укорачивается, но на краю образуется утолщение, при этом первоначальный объем и, соответственно, масса сохраняются.

Частицы комковатой формы с относительно сглаженными сторонами и сбитыми вершинами легко перекатываются под воздействием потока и приобретают вид, близкий к сфероиду (А и А4).

Если маркер (В1) имеет форму утолщенной пластины, в процессе помола он получает удары по краям, движущимся под воздействием образующего воздушного потока с мелкообломочным материалом 2.

Края пластины расковываются, и пластина Б1 преобразуется в вид тороида, показанного на рисунке 4-Б2. При более продолжительном пребывании ковкие частицы пластинчатой формы сворачиваются в рулоны или в конверты, и в конечном счете частицы изометризируются и приобретают сферовидную форму.

Характерны результаты исследований со специальными маркерами пластинчатой формы размером 0,5х2х3 мм, представляемой как форма частиц, наиболее сложная к изометризации. При обработке частиц на мельнице с дополнительной функцией изометризации 30% полезного компонента сохранили более или менее свою изначальную форму, 55% из них превратились в тороиды с перегородкой внутри, 15% приобрели сферовидную форму.

Таким образом, в испытанной мельнице сохраняется высокая степень измельчения и усиливается эффект изометризации ковких компонентов руды (золота), что показано на примере свинцовых маркеров.

С точки зрения технологии последующего извлечения золота гравитационным способом важно повышение гидравлической крупности частиц после обработки. Экспериментальные работы по изучению

трансформации свойств раскрытых и свободных ковких частиц в конусной мельнице показали, что в процессе повышения гидравлической крупности пластинчатых частиц существенную роль играют интенсивные столкновения маркера с измельченным материалом в нижней зоне рабочей камеры мельницы. Наибольшая степень увеличения толщины частиц наблюдается при максимальной загрузке мельницы (до 30 кг/ч), что приводит к существенному повышению их извлекаемости методами сухого обогащения (сепарации) за счет повышения их гидравлической крупности (ГК) от 1,5 раза. На рисунке 5 представлена зависимость гидравлической крупности от параметров частиц свинцовых маркеров после обработки на конусной мельнице при исходной ГК 19 см/с.

Например, для испытанных специальных маркеров пластинчатой формы размером 0,5х2х3 мм с усредненной массой 26 мг исходная скорость погружения частиц (гидравлическая крупность) составляет 19 см/с. После обработки на мельнице полученные частицы тороидной формы сохраняют исходную массу, но в зависимости от толщины тора гидравлическая крупность варьируется от 28 до 32 см/с.

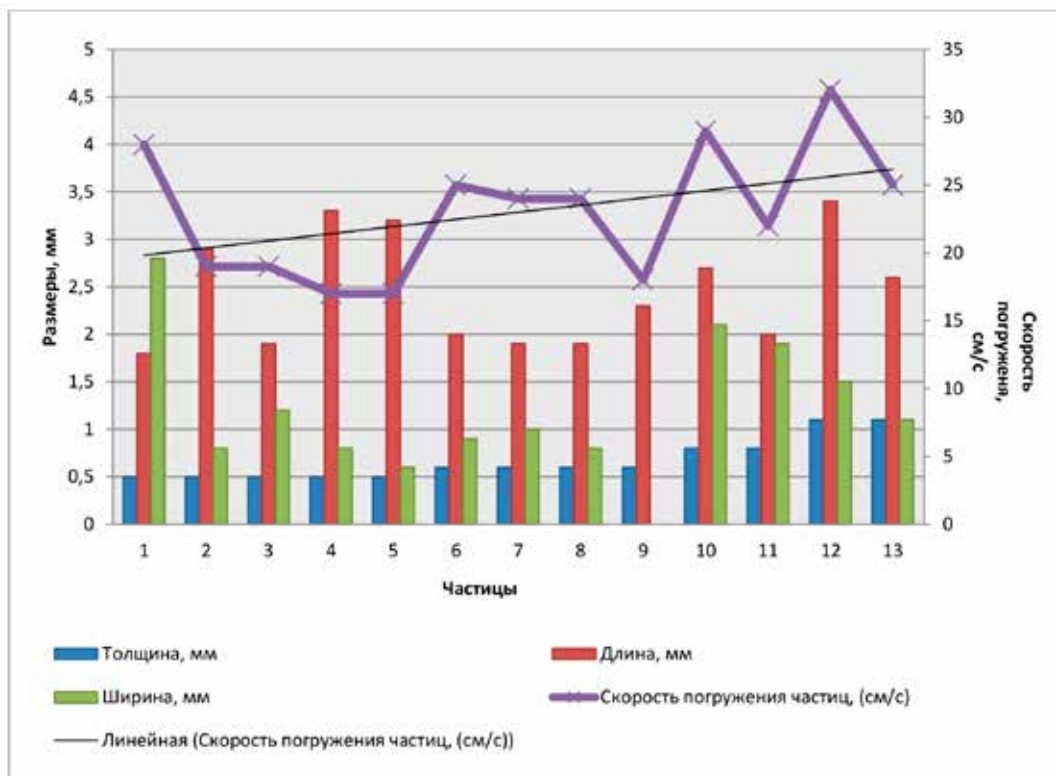


Рис. 5. Зависимость гидравлической крупности от параметров частиц свинцовых маркеров после обработки на конусной мельнице при исходной ГК 19 см/с

Заключение

В результате экспериментальных исследований по измельчению рудного материала крупностью фракции – 5 мм с имитаторами свободного золота в виде частиц свинца на лабораторной модели конусной двухступенчатой мельницы установлено, что высокая эффективность измельчения достигается при максимальной загруженности рабочей зоны. Изометризации (комкованию) подвергаются все частицы свинца в диапазоне крупности 0,5–3 мм, что приводит к существенному повышению их извлекаемости гравитационными методами обогащения за счет повышения их гидравлической крупности от 1,5 раза.

Сохранение физического веса ковких частиц при измельчении и повышение их извлекаемости в процессе помола в новой модели мельницы являются наиболее важными особенностями и одновременно преимуществом разработанной конструкции

применительно к переработке золотосодержащих руд методами сухого обогащения.

Лабораторные исследования проводились на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант №13.ЦКП.21.0016).

Список литературы

1. Винокуров В.Р. Применение мельницы сухого многократного ударного действия при измельчении золотосодержащих руд месторождения «Малый тарын» // Горный информационный аналитический бюллетень. 2021. № 12-1. С. 48-58.
2. Лебедев И.Ф., Крылатова С.Р., Гаврильев Д.М., Яковлев Б.В. Статистический метод определения движения частицы в винтовом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 9. С. 165-171.
3. Газалеева Г.И., Цыпин Е.Ф., Червяков С.А. Рудоподготовка. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению. Екатеринбург: ООО «УЦАО», 2014. 914 с.
4. Филиппов В.Е., Гаврильев Д.М., Лебедев И.Ф., Осипов Д.А. Центробежный конусный истиратель с зоной изометризации ковких частиц // Патент РФ № 209676. Патентообладатель ИГДС СО РАН. 2022. Бюл. № 8.
5. Матвеев А.И., Осипов Д.А., Яковлев Б.В. Моделирование динамики формы плоского тела из ковкого металла при изотропной бомбардировке частицами песка // Математические заметки СВФУ. 2017. № 1. С. 99-108.