

УДК 622.732.2

**МЕХАНИЗМ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ
В АППАРАТАХ ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНОГО ДРОБЛЕНИЯ**

И. В. Шадрюнова¹, О. Е. Горлова², Е. В. Колодежная³, И. М. Кутлубаев²

¹*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, E-mail: shadrunova_@mail.ru,
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

²*Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
просп. Ленина, 38, 455000, г. Магнитогорск, Россия*

³*ЗАО “Урал-Омега”, просп. Ленина, 89, корп. 7, 455037, г. Магнитогорск, Россия*

Рассматриваются вопросы дезинтеграции металлургических шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления. Представлена модель разрушения куска материала в камере центробежно-ударной дробилки. Разработана схема силового взаимодействия куска шлака и плиты камеры дробилки с учетом распределенного характера инерционных нагрузок. Установлена взаимосвязь конструктивных параметров аппарата и технологических свойств дробимого материала, получена зависимость скорости куска материала от его физико-механических характеристик. Представлены технологические рекомендации по адаптации центробежно-ударного дробления в схемы рудоподготовки техногенного сырья.

Рудоподготовка, дезинтеграция, дробление, центробежно-ударный аппарат, металлургические шлаки, техногенное сырье, физико-механические свойства

Интенсивная эксплуатация месторождений в горнодобывающих районах страны привела к значительному качественному ухудшению и сокращению запасов практически всех видов полезных ископаемых. В сложившейся ситуации начинают вовлекаться в переработку ранее не эксплуатируемые труднообогатимые руды и горнопромышленные отходы, которые имеют сложный химический, минералогический, петрографический состав, неоднородное строения, существенные различия в характере вкрапленности, взаимопрорастания “индивидов”, в размерах и морфологии частиц и т. п. [1]. Повышение требований к полноте и комплексности использования сырья, необходимость разработки и внедрения ресурсо- и энергосберегающих технологий переработки труднообогатимого природного и техногенного сырья делают все более актуальной проблему рационального разрушения материалов на стадии рудоподготовки, а также необходимости переноса части работы измельчения на более ранние стадии дезинтеграции материала.

Основная задача дезинтеграции сырья при подготовке к разделительным процессам состоит в том, чтобы разрушить объект по поверхностям срастания фаз без переизмельчения при минимизации энергозатрат. Используемое в операциях дробления и измельчения горнорудное оборудование реализует разрушение минералов в основном за счет удара, истирания и раздавливания путем многократного уменьшения размеров кусков до крупности наименьшего размера минерального зерна, при которой происходит наиболее полное освобождение минералов. Такой способ разрушения руд имеет низкую селективность дезинтеграции при высоких энергетических затратах, сопровождается переизмельчением уже раскрытых зерен, что снижает технико-эконо-

мические показатели переработки минерального сырья. Также следует отметить, что для большинства аппаратов дробления и измельчения характерно локальное нагружение, при котором создается одна-две цепи локальных перенапряжений в слабых элементах структуры, как правило, по оси приложения местной нагрузки [2, 3]. Вне этой оси очагов локального перенапряжения не возникает, поэтому разрушение следует ожидать только вблизи оси с образованием 2–3 осколков. Процессы множественного разрушения, идущие с достаточной долей селективности, имеют место при образовании сложного напряженного состояния в минерале. Это может быть обеспечено за счет создания внутренних силовых факторов и циклического характера изменения локальных напряжений между минералами в структурном элементе.

Техногенное минеральное сырье характеризуется преобладанием тонкой и тонкодисперсной вкрапленности, наличием сложных структур замещения минеральных зерен, отличными от природных физико-механическими свойствами разрушаемых агрегатов, что еще на стадии рудоподготовки, осуществляемой с использованием традиционного дробильно-измельчительного оборудования, предопределяет низкие технико-экономические показатели их последующего обогащения. Анализ способов дезинтеграции, применяемых в отечественных и зарубежных схемах рудоподготовки, показал, что при разрушении свободным ударом в аппаратах центробежно-ударного дробления происходит наиболее селективное раскрытие разнопрочностных фаз гетерогенных материалов. Именно такой способ дезинтеграции обеспечивает наиболее полное раскрытие сложных минеральных комплексов по границам срастания фаз и, как можно предположить, более высокие показатели последующего обогащения труднообогатимого минерального сырья.

Основным параметром работы центробежно-ударных дробилок является скорость вращения ускорителя, от которой напрямую зависит скорость удара куса материала об отбойную плиту в камере дробления. Для крупного дробления рекомендуется скорость вращения ускорителя 20–35 м/с, для среднего — 35–65, мелкого — 50–90 м/с. Наибольшая степень дробления отмечается при прямом ударе, когда угол между вектором скорости и поверхностью отбойной плиты равен 90°.

Для оценки влияния конструктивных параметров и свойств дробимого материала на технологические параметры дробилки составлена математическая модель движения куса материала в рабочем пространстве центробежно-ударного аппарата. Использована кинематика разрушения куса материала в машинах данного класса [4].

Уравнение динамики, описывающее движение куса по поверхности ротора радиально направляющего ребра (рис. 1а), имеет вид

$$m\ddot{r} = P_c - F_1 - F_2, \tag{1}$$

где m , \ddot{r} — соответственно масса и ускорение куса; F_1 — сила трения куса о поверхность ротора; F_2 — сила трения куса о направляющее ребро; P_c — центробежная сила.

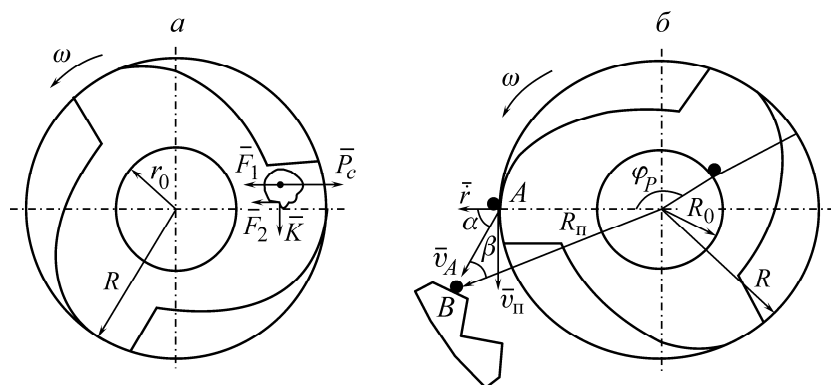


Рис. 1. Схема действия сил на кусок материала при движении его по поверхности ротора (а) и при ударе о поверхность отбойной плиты (б)

Центробежная сила определяется выражением

$$P_c = -m\omega^2 r, \quad (2)$$

где ω — угловая скорость вращения ротора; r — радиус-вектор центра тяжести куска, определяющий его положение на диске ротора.

Сила трения куска о поверхность ротора F_1 определяется как

$$F_1 = fmg, \quad (3)$$

здесь f — коэффициент трения дробимого материала о поверхность ротора; g — ускорение свободного падения.

Сила трения куска о направляющее ребро F_2 возникает в результате действия кориолисовой силы:

$$K = 2m\omega\dot{r}, \quad (4)$$

где \dot{r} — относительная скорость движения куска.

Сила трения куска о направляющее ребро

$$F_2 = fK = 2fm\omega\dot{r}. \quad (5)$$

Представленное уравнение, описывающее движение материала в рабочем пространстве центробежно-ударной дробилки, позволяет проанализировать влияние конструктивных параметров и свойств дробимого материала на технологические параметры аппарата.

При дроблении материала в дробилке ударного действия результат разрушения зависит от кинетической энергии куска, которая в момент его схода с диска ротора равна

$$W = 0.5m v_A^2, \quad (6)$$

где v_A — скорость куска в момент его схода с диска ротора (рис. 1б), которая напрямую зависит от скорости вращения ускорителя центробежно-ударной дробилки.

Кинетическая энергия удара куска материала об отбойную плиту центробежно-ударной дробилки со скоростью v равна работе A_y , которую осуществляет сила динамического взаимодействия P_d на перемещении ε — величину сжатия куска при ударе. Величина ε равна смещению центра инерции куска. В конце удара значения силы P_d и величины ε максимальны:

$$A_y = \int_0^{\varepsilon_{\max}} P_d d\varepsilon = \frac{mv^2}{2}. \quad (7)$$

Для определения взаимосвязи параметров работы дробилки, а именно скорости вращения ускорителя, и физико-механических свойств разрушаемого материала необходимо найти максимальные значения силы P_d и величины ε . Для расчета использована зависимость между силой P_d и величиной ε , выведенная Герцем в теории соударяющихся тел для статического сжатия [5]. Так как продолжительность удара значительно превосходит период низких частот собственных колебаний соударяющихся тел, то предположили, что данная зависимость Герца сохраняется и при динамическом взаимодействии твердых тел.

Исходное уравнение теории Герца имеет вид

$$-P_d = m \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} \quad (8)$$

(знак “–” учитывает снижение ускорения при увеличении силы P_d).

По исследованиям Герца приближение (сжатие) ε шара к плите связано с силой P_d — взаимодействия шара и плиты — следующим уравнением:

$$P_d = K_1 \varepsilon^{3/2}, \quad (9)$$

где $K_1 = \frac{4}{3} \frac{E}{1-\mu^2} \sqrt{r}$ — коэффициент, зависящий от свойств разрушаемого материала, E — модуль упругости дробимого материала, Па, μ — коэффициент Пуассона, r — радиус шара (куска), м.

Приравнявая правые части выражений (8) и (9), получим

$$\frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} = \frac{1}{m} \frac{4}{3} \frac{E}{1-\mu^2} \sqrt{r} \varepsilon^{3/2}.$$

Учитывая, что $\frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \frac{v dv}{d\varepsilon}$, и умножив обе части на $d\varepsilon$, находим

$$v dv = K_1 K_2 \varepsilon^{3/2} d\varepsilon,$$

где v — скорость куска, м/с; $K_1, K_2 = 1/m$ — коэффициенты, зависящие от свойств разрушаемого материала.

Интегрируя это уравнение (левую часть в пределах от v до v' , правую — от 0 до ε):

$$\int_v^{v'} v dv = K_1 K_2 \int_0^\varepsilon \varepsilon^{3/2} d\varepsilon,$$

находим

$$\frac{1}{2}(v'^2 - v^2) = K_1 K_2 \frac{2}{5} \varepsilon^{5/2}.$$

Решая данное уравнение относительно ε и полагая, что скорость в конце удара v' равна нулю, получим выражение для определения максимального значения ε :

$$\varepsilon_{\max} = \left(\frac{5}{K_1 K_2} \right)^{2/5} \left(\frac{v}{2} \right)^{4/5}.$$

При подстановке ε_{\max} в выражение (10) максимальная сила взаимодействия куска материала с отбойной плитой будет равна

$$P_{d\max} = K_1 \left(\frac{5}{K_1 K_2} \right)^{3/5} \left(\frac{v}{2} \right)^{6/5}.$$

При подстановке значений коэффициентов K_1 и K_2 запишем

$$P_{d\max} = 1.28 m^{3/5} \left(\frac{E \sqrt{r} v^3}{(1-\mu^2)} \right)^{2/5}. \quad (10)$$

Выражение (10) отражает зависимость динамической силы взаимодействия соударяющихся твердых тел от скорости удара. Для того чтобы установить взаимовлияние параметров работы центробежно-ударной дробилки, а именно скорости удара, и физико-механических характеристик разрушаемого материала, воспользуемся зависимостью для расчета предела прочности материала при сжатии $\sigma_{сж}$. В нашем случае это будет отношение силы динамического взаимодействия P_d , при которой разрушается испытуемый образец при сжатии, к площади его поперечного сечения:

$$\sigma_{сж} = \frac{P_d}{S}. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что сила динамического взаимодействия (при условии, что площадь поперечного сечения куска материала можно представить как круговую) равна

$$P_d = \sigma_{сж} \pi r^2.$$

Приравняв правые части уравнений (10) и (11) и решив данное выражение относительно U , получим уравнение зависимости абсолютной скорости куска материала, разрушаемого в камере центробежно-ударной дробилки, от его физико-механических свойств:

$$v = 3.19 \sigma_{сж}^{5/6} \sqrt[3]{\frac{(1-\mu^2)}{E}} \sqrt{\frac{r^3}{m}},$$

где 3.19 — эмпирический коэффициент.

Полагая, что v равна линейной скорости куска при сходе с ускорителя дробилки, находим зависимость скорости куска материала в камере центробежно-ударной дробилки от геометрических и физико-механических характеристик куска.

Выразив массу куска через его плотность и объем, при условии, что форма куска близка к шару, запишем выражение

$$v = 3.19 \sigma_{сж}^{5/6} \sqrt[3]{\frac{(1-\mu^2)}{E}} \sqrt{\frac{3}{4\pi\rho}}, \quad (12)$$

где ρ — плотность материала, кг/м³.

Зависимость (12) позволяет рассчитать параметры работы центробежно-ударного аппарата исходя из обеспечения оптимальной скорости для каждого вида дробимого материала и с учетом его свойств. Оснащение дробилки частотным преобразователем может выполнять это в оперативном режиме без проведения дополнительных работ.

Существенным фактором, определяющим процесс дезинтеграции, является характер силового взаимодействия куска материала и отбойной плиты. При этом необходимо учитывать неоднородность структуры и механических свойств в пределах каждого куска. Следует полагать, что структурно-неоднородные материалы, обладающие различием физико-механических свойств отдельных структурных элементов, будут разрушаться в центробежно-ударных аппаратах наиболее селективно по границам срастания фаз. К таким структурно-неоднородным техногенного происхождения материалам относятся металлургические шлаки. Ранее проведенными исследованиями установлено, что шлаки черной и цветной металлургии представляют собой преимущественно силикатные образования с неравномерной вкрапленностью индивидуализированных рудных техногенных фаз с четкими границами [6]. Наличие таких фаз благоприятно влияет на их высвобождение из шлакообразующей матрицы при дезинтеграции. Размер (массовый гранулярный состав) рудных фаз варьирует от 60 до 352 мкм, неметаллические (шлакообразующие) выделения имеют размер менее 500 мкм, их соотношение по средним размерам равно 0.2–0.6. Силикатная матрица и рудные минералы в шлаках существенно различаются морфоструктурными характеристиками и физико-механическими свойствами. Микротвердость силикатной матрицы изученных шлаков составляет 293–474 кг/мм², что значительно выше микротвердости рудных фаз 182–148 кг/мм². Оксидные фазы обладают более высокой микротвердостью по сравнению с силикатными. Установлено также, что силикатные и алюмосиликатные минералы шлаковых фаз характеризуются повышенной хрупкостью (суммарный балл хрупкости 35–45) по сравнению с рудными минералами (суммарный балл 19–27). Металлы имеют большую зону пластической деформации, предшествующей разрушению, по сравнению со шлакообразующими нерудными фазами и не склонны к хрупкому разрушению. Полученные данные позволяют представить кусок шлака в виде совокупности фрагментов, имеющих различные плотности, крупности, факторы формы и физико-механические свойства (рис. 2а).

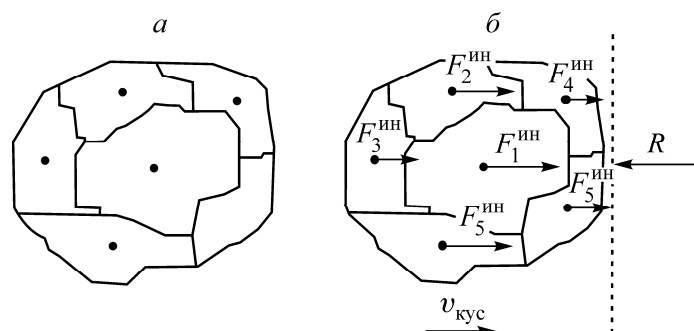


Рис. 2. Схема нагружения куска шлака в камере центробежно-ударной дробилки: *а* — представление куска материала (шлака) в виде совокупности различных фрагментов; *б* — схема силового взаимодействия “кусок – плита камеры дробления”

Схема нагружения в начальной фазе контакта “кусок – плита камеры дробления” приведена на рис. 2б. В куске материала возникают распределенные силы инерции, обусловленные резким его торможением на плите и направленные вдоль вектора скорости на последней фазе движения. Полагаем, что вектор скорости перпендикулярен поверхности плиты. С учетом существенной разницы плотностей фрагментов, составляющих кусок, силу инерции следует представлять в виде совокупности элементарных сил инерции $F_i^{\text{ин}}$, приложенных к центрам масс выделенных фрагментов. Элементарные силы инерции определяются по формуле

$$F_i^{\text{ин}} = V_i \rho_i a_{\text{ост}},$$

где V_i — объем фрагмента, м^3 ; ρ_i — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; $a_{\text{ост}}$ — ускорение при торможении, $\text{м}/\text{с}^2$.

Таким образом, чем больше различия плотностей и объемов отдельных фаз в разрушаемом материале, тем больше различие элементарных сил инерции, возникающих во фрагментах. Такое различие сил инерции и их распределенный характер способствуют тому, что в процессе центробежно-ударного дробления в куске шлака возникают нормальные напряжения, обусловленные как сжатием $\sigma_{\text{сж}}$, так и вызванные изгибом $\sigma_{\text{из}}$, при этом интенсивность последних превышает $\sigma_{\text{сж}}$. Зона действия напряжений значительно расширяется по сравнению с локальным нагружением, и, следовательно, вероятность разрушения по трещинам, находящимся в этой зоне, повышается.

Селективность разрушения металлургических шлаков в инерционных аппаратах определяется также и геометрией зерен отдельных фаз. Изгибающие напряжения в зерне уменьшаются при увеличении значения фактора круглой формы (рис. 3). В изученных шлаках медной плавки рудные минералы, в частности включения металлической меди, имеют фактор формы, близкий к 1 (0.7–0.92), свидетельствующий об изометричной (округлой) форме рудных выделений с четкими ровными границами, а в структуре фаялитовой матрицы наблюдаются таблитчатые и пластинчатые зерна фаялита и панидиоморфные зерна вюститита [6]. Следовательно, при разрушении шлаков в центробежно-ударных аппаратах в первую очередь будет происходить разрушение призматических и игольчатых зерен фаялита, железо-магниевого оксида и зерен неправильной формы мелилита, а разрушение металлических включений будет носить только характер сколов.

Проведенные теоретические исследования позволили разработать некоторые технологические рекомендации по рудоподготовке техногенного сырья с использованием аппаратов центробежно-ударного дробления. Скорость вращения ускорителя дробилки — доминантный и регулируемый параметр ее работы, определяющий кинетическую энергию куска в момент схода его с диска ротора и эффективность разрушения. Оптимизация скорости вращения ускорителя центробежно-ударных дробилок с учетом физико-механических характеристик разрушаемого материала позволяет реализовывать селективную дезинтеграцию структурно-неоднородных материа-

лов и способствует раскрытию сростков ценного компонента без переизмельчения при снижении энергозатрат. Выбор скорости вращения ускорителя в пределах 50–100 м/с необходимо проводить таким образом, чтобы получать продукт крупностью 5–10 мм и не перевести ценный компонент в шламы, не поддающиеся обогащению. Установка центробежно-ударных дробилок на стадии мелкого дробления дает возможность снизить крупность питания мельниц до 5–10 мм и тем самым увеличить производительность процесса измельчения на 25–30 %, снизить потребление электроэнергии и увеличить срок службы футеровки мельницы.

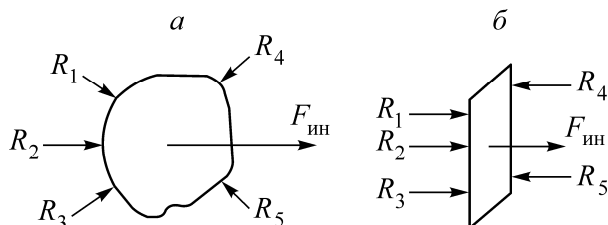


Рис. 3. Схема действия сил на зерна округлой (а) и изометричной (б) форм

ВЫВОДЫ

Различие физико-механических свойств и морфометрических параметров отдельных фаз металлургических шлаков способствует селективности процесса дезинтеграции в аппаратах центробежно-ударного дробления и позволяет раскрывать сростки металлических включений еще на стадии дробления. Полученная математическая зависимость скорости куска материала в камере центробежно-ударной дробилки от физико-механических характеристик разрушаемого материала дает возможность определять и регулировать параметры работы дробилки исходя из обеспечения оптимальной скорости для каждого вида дробимого материала в зависимости от его свойств.

Использование в технологических схемах переработки металлургических шлаков аппаратов центробежно-ударного дробления сможет обеспечить стабильность и селективность процесса дезинтеграции шлаков, а также повысить технологические показатели не только процесса рудоподготовки, но и последующих операций обогащения. Эффективное вовлечение в промышленную переработку горно-промышленных отходов, в частности металлургических шлаков, создает условия для расширения минерально-сырьевой базы России, исключения отчуждения сельхозгодий, уменьшения образования пыли и загрязнения водного и воздушного бассейнов, и в целом позволяет снизить экологическую напряженность в основных металлургических провинциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Шадрунова И. В., Горлова О. Е. Адаптация разделительных процессов обогащения полезных ископаемых к техногенному сырью: проблемы и решения // Обогащение руд. — 2012. — № 5.
2. Вайсберг Л. А., Биленко Л. Ф., Баранов В. Ф. Современное состояние и основные направления развития процессов рудоподготовки // Современные проблемы комплексной переработки природного и техногенного сырья: материалы междунар. совещ. “Плаксинские чтения-2007”. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2007.
3. Ревнивцев В. И. О рациональной организации процесса раскрытия минералов в соответствии с современными представлениями физики твердого тела // Механобр. — 1975. — № 10.
4. Паладеева Н. И. Дробилки ударного действия // Горн. журн. — 1996. — № 10-11.
5. Косарев А. И., Силенок Д. С. Молотковые дробилки для промышленности строительных материалов. — М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1979.
6. Шадрунова И. В., Ожогина Е. Г., Колодежная Е. В., Горлова О. Е. Оценка селективности дезинтеграции металлургических шлаков // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.

Поступила в редакцию 25/VIII 2014