

### Библиографический список

1. Тартаковский Б. Н. Конвейерные поезда в горной промышленности / Б. Н. Тартаковский, Б. З. Палей, Л. М. Солодовник [и др.]. – К.: Наукова думка, 1974. – 207 с.

2. Михайлов В. А. Методика расчета ходовых сопротивлений конвейерных поездов для различных режимов работы / В. А. Михайлов, Ю. Н. Ронжес, В. Г. Трусий, Ю. А. Малиновский // Кривой Рог. – 1985. – Рук. деп. в УкрИИНТИ, 346 Ук – 85 деп. – 28 с.

3. Спиваковский А. Д. Транспортирующие машины / А. Д. Спиваковский, В. К. Дьячков. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.

4. Попов С. О. Особенности применения конвейерных поездов при добыче полезных ископаемых на глубоких горизонтах / С. О. Попов, Ю. А. Малиновский, Г. В. Данилина, С. Н. Козырев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 4. – С. 106–110.

Поступила 09.03.2016



УДК 622.807 : 621.928.8

Наука

**И. В. Шадрунова /д. т. н./, Т. В. Чекушина /к. т. н./**  
Институт проблем комплексного освоения недр  
РАН, г. Москва, Россия

**Е. В. Колодежная /к. т. н./, О. Е. Горлова /к. т. н./,  
Н. Н. Орехова /д. т. н./**

Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск,  
Россия

**В. И. Ляшенко**

ГП «УкрНИПИИПромтехнологии»,  
г. Желтые Воды, Украина

## Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий и технических средств для переработки труднообогатимого сырья\*

*Изложена ресурсосберегающая технология, основанная на закономерностях разрушения труднообогатимого материала в центробежных дробилках ударного действия.*

*Приведена математическая зависимость необходимой скорости вращения ускорителя дробилки ударного действия от физико-механических характеристик разрушаемого материала. Дана оценка влияния способа дробления шлаков на показатели его последующей переработки. Показана более высокая раскрываемость зерен металлической меди и сульфидов меди при дроблении шлаков в центробежно-ударной дробилке ДЦ по сравнению со щековой дробилкой. (Ил. 3. Табл. 3. Библиогр.: 18 назв.)*

**Ключевые слова:** рудоподготовка, дезинтеграция, интергранулярное разрушение, центробежно-ударная дробилка, шлаки медной плавки, физико-механические свойства.

*Resource-saving technology based on regularities of destruction of complex material in centrifugal crusher of shock action is explained. Mathematical dependence of necessary rotational speed of the accelerator of a crusher of shock action on physicomachanical characteristics of destroyed material is given. The impact assessment of a method of crushing of slags on indices of its subsequent processing is given. Higher solvability of grains of metal copper and sulfides of copper when crushing slags in centrifugal shock crusher BC on comparing with jaw crusher is shown.*

**Key words:** ore pretreatment, disintegration, intergranular destruction, centrifugal impact breaker, slags of copper smelting, mechanical-and-physical properties

\* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, Соглашение № 14.604.21.0128 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60414X0128).

**Актуальность проблемы**

В процессе работы горно-металлургического, энергетического комплексов Украины и России накопилось значительное количество отходов, содержащих полезные компоненты, которые могут быть из них извлечены с меньшими затратами, чем из природных месторождений.

Так, в отходах тепловых электростанций Украины накоплено значительное количество угля, металла, других полезных ископаемых.

Криворожской ТЭС в среднем ежегодно образуется более 500 тыс. т золошлаков. Поскольку здесь принято их гидравлическое удаление, то происходит интенсивное загрязнение воды солями тяжелых металлов, образующихся при сжигании углей. При этом общий ежегодный объем сбрасываемой воды в открытые водоемы колеблется от 6,5 до 7,5 млн м<sup>3</sup>. Основные негативные воздействия золоотвала на окружающую среду состоят в фильтрационных утечках воды из чаши сооружения и пылении подсыхающих отложений, занимающих площадь около 430 га. Дезинтеграция на основе свободного удара куска руды о преграду по сравнению с другими способами разрушения происходит в первую очередь по ослабленным направлениям, каковыми являются границы срастания минералов, линии естественного разлома, с наведением широкой сети микротрещин за счет различия прочностных свойств компонентов и различного сопротивления удару. Тем самым обеспечивается более высокая степень раскрытия ценных минералов при большей крупности дробленого продукта, что имеет решающее значение при дальнейшем обогащении и позволяет в ряде случаев начинать обогащение уже на стадии дробления с выделением отвальных хвостов [9]. В России накоплено более 800 млн т шлаков черной и цветной металлургии, в том числе 350 млн т шлаков черной металлургии, 125 млн т шлаков медной плавки и более 200 млн т никелевых. Шлаки медной плавки все чаще рассматриваются как ресурс меди, а накопленные их объемы в России могут конкурировать с объемами поставленных на баланс месторождений полезных ископаемых. Высокое содержание полезных компонентов в отходах обусловлено применяемой в то время несовершенной техникой и технологией их извлечения. Особенно это относится к проблемам разрушения материала, что позволяет более полно раскрыть компоненты, необходимые для извлечения [10].

Анализ способов дезинтеграции, применяемых в отечественных и зарубежных схемах рудоподготовки, показал, что при разрушении в аппаратах центробежно-ударного дробления происходит наиболее селективное раскрытие

разнопрочностных фаз гетерогенных материалов [11-12].

Процесс разрушения материалов в центробежно-ударных дробилках по сравнению с разрушением материала за счет сдвиговых напряжений в конусных и щёковых дробилках имеет и ряд других преимуществ: высокая степень механоактивации дробленого материала; высокая энергонапряженность в зоне дробления, что обеспечивает высокую степень дробления; получение более равномерного гранулометрического состава продуктов дробления, который практически не зависит от износа рабочих органов; низкая энергоёмкость и металлоёмкость; низкий уровень капитальных и эксплуатационных затрат за счет отсутствия фундаментов дробилок и простоты их обслуживания. Такой способ дезинтеграции обеспечит интергранулярное разрушение шлаков медной плавки, раскрытие сложных минеральных комплексов в составе шлаков и более высокие показатели последующего флотационного обогащения этого техногенного сырья.

**Объект исследования**

Объектом исследования послужил шлак медной плавки ЗАО «Карабашмедь». По агрегатному состоянию шлаки медной плавки представляют собой куски застывшего расплава довольно однородного состава крупностью –100...+10 мм. Шлаки содержат в среднем до 1,5 % меди, 0,3 г/т золота и 10 г/т серебра.

**Цель работы**

Разработка ресурсосберегающих технологий и технических средств на основе изучения закономерностей разрушения шлаков медной плавки с учетом удара свободнолетающего с большой скоростью куска о преграду, изучения селективной дезинтеграции шлаков с использованием центробежно-ударного дробления для повышения показателей их последующего флотационного обогащения [1-5].

**Методы исследования**

Для оценки поведения шлаков под влиянием внешних нагрузок проведено изучение фазового состава, структурно-технологических, физико-механических свойств шлака. Электронно-микроскопическое изучение шлаков проведено с помощью сканирующего электронного микроскопа Leo 1420 VP, качественный элементный анализ состава образцов осуществлялся установленным на микроскопе рентгеновским энергодисперсионным спектрометром INCA-300. Морфоструктурные параметры рудных минералов шлаков (массовый гранулярный состав, фактор формы) определены оптико-геометрическим методом с помощью системы анализа изображений SIAMS-600.

Прочностные свойства основных фаз шлаков оценивались по показателям «микрорхрупкость» и «микротвердость», которые определены с помощью полуавтоматического микротвердомера ПТМ-3 [13]. Микротвердость основных фаз исследуемых шлаков определена по методу восстановленного отпечатка после вдавливания индентора, имеющего форму четырехгранной пирамиды с квадратным основанием (метод Виккерса) [14]. Хрупкость оценивалась по числу отпечатков с трещинами одного типа и по характеру трещин. Суммарный балл хрупкости рассчитывался по формуле:

$$Z_p = 0 \times n_0 + 1 \times n_1 + 2 \times n_2 + 3 \times n_3 + 4 \times n_4 + 5 \times n_5, \quad (1)$$

где 1-5 – балл хрупкости в зависимости от характера отпечатка;  $n_0, n_1, n_2, \dots$  – количество отпечатков с данным баллом хрупкости, соответственно.

Анализ раскрываемости шлака при различных способах разрушения проводился по количеству свободных зерен рудных минералов и их сростков с фаялитом в продуктах дробления с помощью промышленной системы анализа изображений SIAMS-600 и автоматизированного анализатора оптико-минералогических исследований горных пород, руды и рудных концентратов Минерал С7.

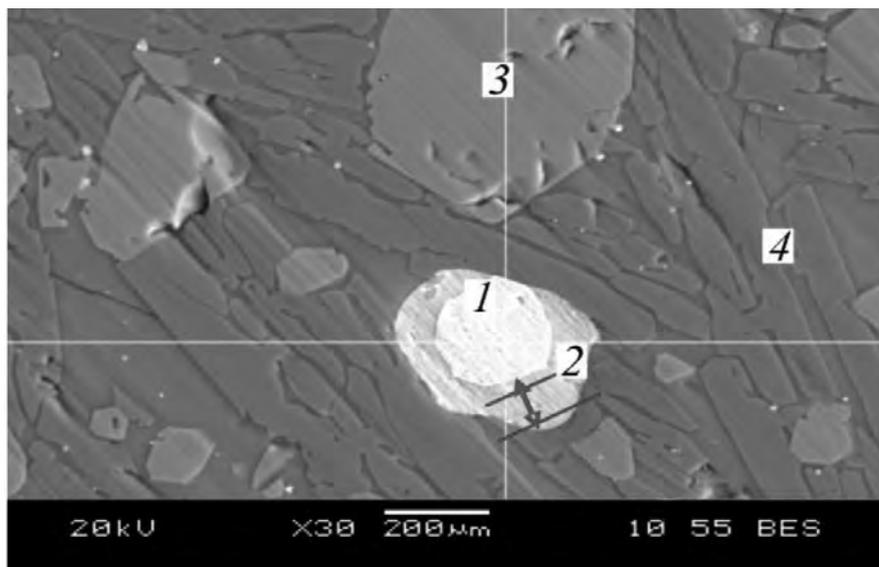
Для опытно-экспериментальной оценки предложенной технологии селективной дезинтеграции шлаков проведено флотационное обогащение медного шлака ЗАО «Карабашмедь», раздробленного в щековых и конусных дробилках и с использованием центробежно-ударной дробилки ДЦ-0,63 в третьей стадии дробления. Флотация проводилась по схеме прямой

селективной флотации в лабораторной флотационной машине объемом 3 дм<sup>3</sup> с использованием собирателя бутилового калия, пенообразователя Т-92 и извести в качестве регулятора среды.

**Изложение результатов исследований**

Минеральный состав шлаков, как и горных пород, включает в основном силикаты и оксиды. Специфические особенности образования шлаков обуславливают отличие от природных руд по вещественному составу и свойствам, присутствие необычных техногенных фаз, которые не встречаются в природе [15]. В свою очередь, от фазового состава шлаков зависит модуль их основности. На специфику минерального состава шлаков влияют условия образования, а также скорость их охлаждения.

Усовершенствование экспериментальной техники и внедрение инновационных технологий изучения техногенного сырья с помощью электронных сканирующих микроскопов позволило диагностировать основные фазы шлака. Установлено, что металлургические шлаки ЗАО «Карабашмедь» сформированы  $2FeO \cdot SiO_2$ , в структуру которого, возможно, изоморфно входит цинк. Также в шлакообразующей матрице идентифицируется силикат цинка ( $Zn_2SiO_4$ ). Медь присутствует в виде самородной меди и сульфидных минералов (халькопирит  $CuFeS_2$ , борнит  $Cu_5FeS_4$ ). Самородная медь имеет форму, размер выделений достигает 200 мкм в диаметре, нередко вокруг отмечаются гранитовые каемки. На долю сульфидных минералов приходится до 20 % меди от всего металла в шлаке. Они присутствуют в виде зерен округлой формы размером 1 мкм и менее (рис. 1).



**Рис. 1. Микрофотографии и фазовый состав медного шлака ЗАО «Карабашмедь»:**

- 1 – металлическая медь; 2 – цинковая шпинель  $ZnO \cdot Al_2O_3$ ;
- 3 – матрица – фаялит  $FeO \cdot SiO_2$  с примесями  $2ZnO \cdot SiO_2$ ; 4 – вюстит  $FeO$  с примесями Zn, Cr, Al

Изучение фазового состава показало, что шлаки сформированы в основном силикатными и алюмосиликатными фазами. В шлаках медной плавки матрица представлена железосодержащим оливином – фаялитом. Отличительной особенностью шлаков переработки цветных металлов является наличие эвтектических структур и присутствие гранита, механизм образования которого недостаточно ясен. Наличие индивидуализированных рудных фаз с четкими границами благоприятно влияет на их высвобождение из шлакообразующей матрицы при дезинтеграции.

При изучении морфоструктурных параметров рудных минералов шлака оптико-геометрическим методом установлено (рис. 2), что включения металлической меди имеют фактор формы 0,92, близкий к единице, свидетельствующий об изометричной (округлой) форме рудных выделений с четкими ровными границами [15]. 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. Средний размер (массовый гранулярный состав) рудных фаз составляет 352 мкм. В ап-

паратах центробежно-ударного дробления происходит селективное разрушение компонентов материала, обладающих различным сопротивлением удару – хрупкостью и твердостью. При изучении физико-механических свойств основных фаз шлаков были установлены существенные различия микротвердости и микрохрупкости основных фаз шлака (табл. 1).

Значение микротвердости силикатной матрицы исследуемого шлака значительно выше микротвердости металлических включений. Пониженная микротвердость фаялита, присутствующего в шлаках ЗАО «Карабашмедь», которая составила 293 кг/мм<sup>2</sup>, объясняется длительным нахождением данных шлаков в отвалах и связанными с этим процессами гипергенеза, а также наличием ZnO в его составе. Микротвердость составила 265 кг/мм<sup>2</sup>, что также объясняется особенностями техногенного состава данного минерала.

Наименее хрупкой рудной фазой является металлическая фаза шлака, суммарный балл хрупкости которой составил 19, минералы шлаковых фаз обладают повышенной хрупкостью (суммарный балл хрупкости 35). Металлы обладают большей зоной пластической деформации, предшествующей разрушению, по сравнению со шлаковыми фазами и не склонны к хрупкому разрушению. Наибольшей хрупкостью в

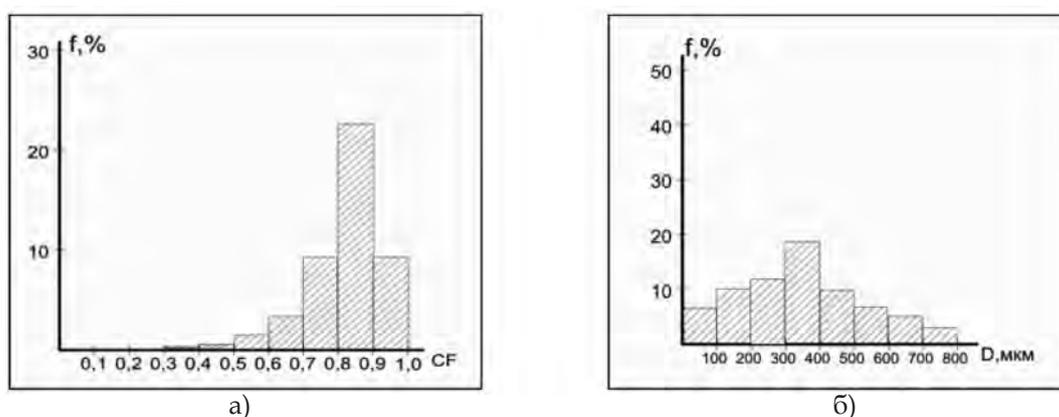


Рис. 2. Морфоструктурные параметры шлаков:

а – фактор формы рудных минералов  $CF = 0.92$ ;  
 б – распределение размеров рудных минералов  $D_{cp} = 352$  мкм

Таблица 1

Микротвердость и микрохрупкость основных фаз шлака

Вид шлака	Фазы	Суммарный балл хрупкости	Микротвердость, кг/мм <sup>2</sup>
Медный шлак ЗАО «Карабашмедь»	Металлическая медь	19	148
	Фаялит с примесями $2ZnO \cdot SiO_2$	35	293
	Цинковая шпинель	102	754
	Вюстит с примесями Zn, Cr, Al	39	265

исследуемых шлаках обладают фазы, суммарный балл хрупкости которых лежит в пределах 100–106. Таким образом, каемки в шлаках имеют не только пониженную твердость, но и склонность к хрупкому разрушению. Структурная неоднородность металлургических шлаков, различие форм и размеров зерен рудных минералов и силикатной матрицы, наличие структур замещения в виде каемок и различия в твердости и хрупкости отдельных фаз шлаков создают предпосылки для концентрации напряжений, условия для зарождения и развития трещин при ударном нагружении, реализуемом в аппаратах центробежно-ударного дробления. Разрушение куска материала свободным ударом будет происходить наиболее селективно, по плоскостям срастания фаз с наведением широкой сети микротрещин.

В качестве критерия селективности дезинтеграции шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления было предложено использовать соотношение микротвердости силикатной фазы  $H_m$  и металлических включений  $H_b$  шлака. Теоретическим анализом было показано, что при  $H_m / H_b > 0,83$  обеспечивается интергранулярное разрушение минеральных фаз по границам их срастания [16]. Для шлака ЗАО «Карабашмедь» отношение микротвердости матрицы и металлических включений составило 5,09, что значительно больше установленного предельного значения 0,83 и свидетельствует о возможности селективного разрушения шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления по границам срастания зерен металлических включений и силикатной матрицы.

Процесс дезинтеграции материалов в аппаратах центробежно-ударного дробления определяется характером силового взаимодействия куска и отбойной плиты. При этом необходимо учитывать неоднородность структуры и механических свойств в пределах каждого куска. Полученные данные о фазовом составе, физико-механических свойствах и структурных параметрах шлака позволили представить кусок шлака в виде совокупности фрагментов, имеющих различные плотности, крупности, факторы формы и физико-механические свойства. При дроблении в центробежно-ударных дробилках шлак через загрузочную воронку подается на разделительный конус ускорителя и равномерно распределяется по каналам ускорителя. Получив необходимую окружную скорость для выброса, кусок с высокой скоростью направляется на отбойную поверхность камеры дробления и, в результате свободного удара, дробится. Дробленный продукт оседает по специальным течкам

вниз дробилки для разгрузки готового продукта (рис. 3).

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, следует силу инерции представлять в виде совокупности элементарных сил инерции, приложенных к центрам масс выделенных фрагментов. Величина элементарных сил инерции определяется по формуле:

$$F_i^{ин} = V_i \cdot \rho_i \cdot a_{ост}, \quad (2)$$

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

Таким образом, чем больше различия в плотности и объеме отдельных фаз в разрушаемом материале, тем больше различие сил инерции, возникающих в фазах. В медных шлаках ЗАО «Карабашмедь» плотность включений меди составляет  $8,3 кг/м^3$ , а фаялита –  $4,39 кг/м^3$ . При этом размеры металлических зерен и зерен фаялита, соответственно, 352 и 200 мкм. Такое различие величин сил инерции и распределенный характер этих сил способствуют тому, что в процессе центробежно-ударного дробления в куске шлака возникают как нормальные напряжения, обусловленные сжатием  $\sigma_{сж}$ , так и нормальные напряжения, вызванные изгибом  $\sigma_{из}$ , при этом интенсивность последних превышает  $\sigma_{сж}$ . Зона действия напряжений значительно расширяется, по сравнению с локальным нагружением. Такая схема нагружения куска в дробилке ударного действия обеспечивает разрушение материала по границам срастаний зерен при более

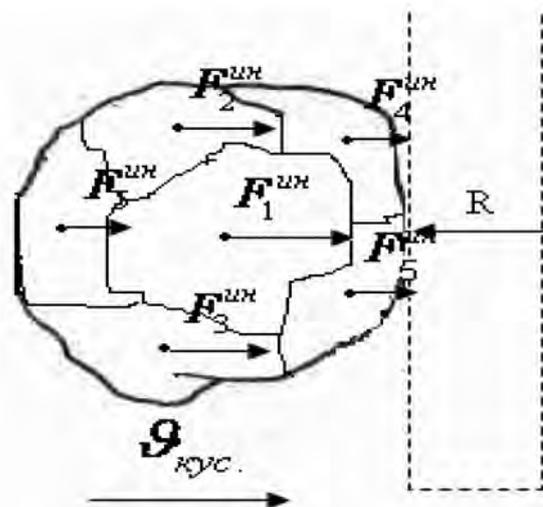


Рис. 3. Схема нагружения куска шлака в камере центробежно-ударной дробилки (обозначения в тексте)

низких значениях ускорений, а следовательно, и меньших энергетических затратах, позволяет раскрывать сростки металлических включений еще на стадии дробления.

Характер разрушения металлургических шлаков в инерционных аппаратах будет определять также и геометрия зерен отдельных фаз [17]. В изученных шлаках медной плавки, как было установлено, рудные минералы, в частности включения металлической меди, имеют фактор формы, близкий к единице (0,7–0,92), свидетельствующий об изометрической (округлой) форме рудных выделений с четкими ровными границами. Следовательно, 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.

Для определения взаимного влияния конструктивных параметров аппарата и технологических свойств дробимого материала была рассмотрена математическая модель движения куска материала в рабочем пространстве центробежно-ударного аппарата [18].

$$v = 3,19 \cdot \sigma_{сж}^{5/6} \sqrt[3]{\frac{(1-\mu^2)}{E}} \cdot \sqrt{\frac{3}{4\rho}}, \quad (3)$$

где  $v$  – линейная скорость куска при сходе с ускорителя дробилки, м/с,  $\sigma_{сж}$  – предел прочности при сжатии, Па;  $E$  – модуль упругости дробимого материала, Па;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;

$\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>, 3,19 – эмпирический коэффициент.

Изучена раскрываемость медного шлака ЗАО «Карабашмедь», раздробленного до крупности менее 5 мм в лабораторной щековой дробилке и центробежно-ударной дробилке ДЦ-0,63. Наиболее мелкий продукт был получен при дроблении шлака в дробилке ДЦ при скорости вращения ускорителя 90 м/с. Номинальная крупность продукта дробления составила 3,5 мм при выходе класса менее 0,071 мм 10,5 %. Содержание флотированного класса крупности менее 0,074 мм в продукте щековой дробилки составило только 4,42 % (табл. 2).

Минералогический анализ показал, что раскрываемость зерен ценных компонентов медных шлаков более высокая при дроблении в аппаратах центробежно-ударного дробления по сравнению со щековой дробилкой. Содержание свободных зерен металлической меди при дроблении шлака в дробилке ДЦ при скорости вращения ускорителя 90 м/с составляет 41,02 %, что значительно выше содержания таких зерен в продукте щековой дробилки – 30,6 %. Суммарное количество раскрытых зерен металлической меди и сульфидов меди при дезинтеграции медных шлаков в аппаратах ДЦ составило 53,34 %, в то время как при стандартном способе рудоподготовки – 40,61 %.

При центробежно-ударном дроблении одновременно с накоплением мелкого флотированного класса крупности менее 0,071 мм происходит обогащение его медьсодержащими зернами.

Таблица 2

Раскрываемость медного шлака

Продукт дробления	Класс крупности, мм	Выход, %	Массовая доля Cu, %	Извлечение Cu, %	Медь, %		Сульфиды, %	
					Свободные зерна	Сростки	Свободные зерна	Сростки
Щековая дробилка $\beta^{-0,071} = 4,42\%$	+0,56	81,84	6,76	84,30	0,45	9,11	0,26	6,88
	+0,28	5,43	7,39	6,11	0,49	11,64	0,67	4,96
	+0,14	6,45	6,25	6,14	0,87	8,75	0,59	3,13
	+0,1	0,30	6,33	0,29	2,30	6,93	0,85	1,32
	+0,071	1,56	5,44	1,29	6,06	3,15	3,22	0,66
	+0,045	2,03	3,17	0,98	8,73	1,58	2,78	0,51
	-0,045	2,39	2,42	0,88	11,70	0,64	1,64	0,13
	Итого:	100	6,56	100,00	30,60	41,80	10,01	17,59
ДЦ, 90 м/с $\beta^{-0,071} = 10,5\%$	+0,56	58,9	6,26	56,15	0,38	5,87	0,26	6,77
	+0,28	12,70	6,94	13,42	0,42	9,13	0,54	3,08
	+0,14	14,20	6,68	14,45	0,55	8,65	0,53	1,69
	+0,1	0,60	7,11	0,65	4,78	5,65	1,75	0,76
	+0,071	3,10	7,34	3,47	9,09	2,57	4,02	0,54
	+0,045	4,70	7,48	5,35	11,67	1,49	2,44	0,21
	-0,045	5,80	7,37	6,51	14,13	0,14	2,78	0,11
	Итого:	100	6,57	100,00	41,02	33,50	12,32	13,16

ми. Извлечение меди в этот класс увеличилось с 1,86 % при дроблении в щековой дробилке до 11,86 % при дроблении в ДЦ, количество раскрытых свободных зерен металлической меди и сульфидов меди в этом классе возросло с 24,85 до 30,24 %. Это позволило рекомендовать использование центробежно-ударных дробилок в схемах рудоподготовки медных шлаков для повышения количества раскрытых зерен ценных компонентов перед последующим флотационным обогащением, а также для переноса части работы измельчения на дробление и тем самым сокращения количества затрачиваемой энергии. Для переработки медных шлаков рекомендуется третью стадию дробления проводить в центробежно-ударной дробилке ДЦ-1,6.

При вовлечении в повторную переработку лежалых шлаков из отвалов флотация является основным методом доизвлечения меди. Проведено флотационное обогащение медного шлака ЗАО «Карабашмедь», раздробленного в щековых и конусных дробилках и с использованием дробилки ДЦ-0,63 в третьей стадии дробления. Технологическая схема переработки медного

шлака включала операции дробления, классификации, измельчения, медной головки, доизмельчения, основной медной флотации. Технологические показатели флотации шлаков, рудоподготовка которых включала селективную дезинтеграцию в центробежно-ударной дробилке, выше показателей, полученных при переработке шлаков, раздробленных с использованием традиционных дробилок. Массовая доля меди в медном концентрате составила 27,04 % при извлечении 96,27 % (массовая доля меди в исходном шлаке 6,35 %). При обогащении шлака, подготовленного к флотации стандартным способом, массовая доля меди в медном концентрате не превышала 21,58 % при извлечении меди 76,86 % (табл. 3).

Таким образом, при увеличении скорости вращения ускорителя центробежной дробилки улучшается качество получаемого медного концентрата и возрастает извлечение меди в концентрат. При скорости вращения ускорителя дробилки 90 м/с достигнуты наилучшие технологические показатели флотации медных шлаков.

Таблица 3

Результаты флотации медных шлаков

Варианты рудоподготовки	Продукт	Выход, %	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %
Дробление в щековой дробилке	Концентрат	22,62	21,58	76,86
	Хвосты	77,38	1,90	23,14
Дробление в ДЦ. Скорость вращения ускорителя 50 м/с	Концентрат	22,90	24,62	88,80
	Хвосты	77,10	0,92	11,20
Дробление в ДЦ. Скорость вращения ускорителя 70 м/с	Концентрат	22,34	25,72	90,49
	Хвосты	77,66	0,78	9,51
Дробление в ДЦ. Скорость вращения ускорителя 90 м/с	Концентрат	22,61	27,04	96,27
	Хвосты	77,39	0,31	3,73

### Заключение

Проведенные теоретические исследования и опытно-экспериментальная проверка показали, что использование интергранулярного разрушения в схемах переработки структурно-неоднородного сырья техногенного происхождения – металлургических шлаков – является перспективным. На основании полученных данных о фазовом составе, структурной неоднородности шлаков медной плавки, наличии структур замещения в виде каемок на периферии зерен рудных включений, о существенном различии в твердости и хрупкости отдельных фаз шлаков сделан вывод о возможности интергранулярного раскрытия шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления.

Применение предлагаемой технологии для утилизации золошлаков в условиях Криворож-

ской ТЭС позволит получить товарную продукцию в виде металлического лома (50–70 тыс. т/год) и обеспечит экологическую безопасность в районе расположения золоотвала, уменьшит загрязнение окружающей среды и платежей за ущерб, нанесенный в результате деятельности станции, а также позволит сэкономить капитальные затраты на строительство (расширение) отвала и энергоресурсов, затрачиваемых на гидротранспорт золошлаков и осветление воды, возвращаемой в оборотный цикл ТЭС.

### Библиографический список

1. Ревнивец В. И. О рациональной организации процесса раскрытия минералов в соответствии с современными представлениями физики твердого тела / В. И. Ревнивец // Механобр. – 1975. – № 10. – С. 158–169.

2. Колодежная Е. В. Анализ силового взаимодействия при разрушении породы в дробилках ударного действия / Е. В. Колодежная, И. М. Кутлубаев, И. В. Шадрунова // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2008. – № 2. – С. 9–12.
3. Воробьев А. Е. Инновационные технологии в металлургии / А. Е. Воробьев, А. В. Янковский, Е. С. Морозова // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: материалы XI Международной конференции. – 2012. – С. 173–175.
4. Лисица А. В. Влияние центробежно-ударного способа рудоподготовки на показатели процесса обогащения полезных ископаемых / А. В. Лисица, В. И. Лисица, Л. Ф. Биленко // Обогащение руд. – 2003. – № 3. – С. 39–41.
5. Гурин А. А. Инновационные технологии пылеулавливания на горно-обогатительных предприятиях / А. А. Гурин, В. И. Мулякко, В. И. Ляшенко // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 9. – С. 54–59.
6. Flotation of copper slags in conditions of closed water circulation of concentration plant / M. N. Sabanova, I. V. Shadrunkova, N. N. Orekhova, O. E. Gorlova // Tsvetnye Metally (Non-ferrous metals). – 2014. – № 10. – P. 16–24.
7. Nader Karimi, Ramez Vaghar, Mohammed Reza, Tavakoli Mohammadi, Seyed Ahmad Hashemi. Recovery of Copper from the Slag of Khatoonabad Flash Smelting Furnace by Flotation Method / Karimi Nader, Vaghar Ramez, Reza Mohammed, Mohammadi Tavakoli, Hashemi Seyed Ahmad // Journal of The Institution of Engineers (India) Series D. – 2013, April. – Vol. 94, issue 1. – P. 43–50.
8. Veiskaramia M. Recovery from Copper smelter slag Sample, using Flotation with Two-Level Fractional Factorial Design Approach / M. Veiskaramia, S. Z. Noaparasta, M. Shafaeib, Cu. Gharabaghib // Hydrometallurgical Processes. – 2014, April. – P. 12–16.
9. Чантурия В. А. Адаптация разделительных процессов обогащения полезных ископаемых к техногенному сырью: проблемы и решения / В.А. Чантурия, И.В. Шадрунова, О.Е. Горлова // Обогащение руд. – 2012. – № 5. – С. 43–49.
10. Барон Л. И. Контактная прочность горных пород / Л. И. Барон, Л. Б. Глатман. – М.: Недра, 1966. – 184 с.
11. Паладеева Н. И. Дробилки ударного действия / Н. И. Паладеева // Известия вузов. Горный журнал. – 1996. – № 10–11. – С. 139–145.
12. Kolodezhnaya E. V. Selection decomposition of metallurgical slag by vapart-impact devices / E. V. Kolodezhnaya, I. V. Shadrunkova, V. A. Artomonov, V. V. Vorobiev, A. J. Kozin // The XXIV International Mineral Processing Congress. Beijing. – 2008. – P. 3943–3946.
13. Возможности использования компьютерной системы анализа изображений и методов испытания механических свойств для оценки эффективности переработки руд и техногенного сырья / И. В. Шадрунова, Н. В. Копцева, Е. В. Колодежная, Ю. Ю. Ефимова // Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья: материалы второго Российского семинара технологической минералогии. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. – С. 60–61.
14. Лебедева С. И. Микротвердость минералов / С. И. Лебедева. – М.: Недра, 1977.
15. Анализ и выбор способов переработки металлургических шлаков / Е. Г. Ожогина, Е. С. Броницкая, С. И. Ануфриева [и др.] // Цветные металлы. – 2002. – № 8. – С. 26–30.
16. Slag disintegration selectivity / I. V. Shadrunkova, E. G. Ozhogina, E. V. Kolodezhnaya, O. E. Gorlova // Journal of Mining Science. – 2013. – T. 49, № 5. – С. 831–838.
17. Курец В. И. К вопросу о форме зёрен при различных видах разрушения / В. И. Курец, И. И. Каляцкий, В. А. Цукерман // Обогащение неметаллических полезных ископаемых. Вып. 2. – Свердловск, 1976. – С. 93–96.
18. Механизм дезинтеграции металлургических шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления / И. В. Шадрунова, О. Е. Горлова, Е. В. Колодежная, И. М. Кутлубаев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 2. – С. 149–155.

**Поступила 13.05.2016**

## Metallurgical and Mining Industry

[www.metaljournal.com.ua](http://www.metaljournal.com.ua)