

УДК 622.732.2

**ОЦЕНКА СЕЛЕКТИВНОСТИ
ДЕЗИНТЕГРАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ**

И. В. Шадрунова¹, Е. Г. Ожогина², Е. В. Колодежная³, О. Е. Горлова⁴

¹*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
111020, г. Москва, Россия*

²*Всесоюзный институт минерального сырья,
111020, г. Москва, Россия*

³*ЗАО “Урал-Омега”, 455000, г. Магнитогорск, Россия*

⁴*Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
455000, г. Магнитогорск, Россия*

Представлены результаты экспериментального изучения фазового состава шлаков черной и цветной металлургии, морфоструктурных параметров и физико-механических свойств отдельных фаз шлаков для оценки селективности их раскрытия по границам срастания фаз в аппаратах, реализующих разрушение свободным ударом. Обоснован критерий селективности дезинтеграции шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления в виде отношения микротвердости основных фаз шлака.

Металлургические шлаки, черная металлургия, цветная металлургия, фазовый состав, физико-механические свойства, селективное разрушение, дезинтеграция, центробежно-ударное дробление

Накопленные и текущие отходы горно-металлургического производства и теплоэнергетики, представленные вскрышными, вмещающими породами, бедными, забалансовыми, некондиционными рудами, хвостами обогащения, техногенными россыпями, золами и шлаками тепловых электростанций, шлаками и шламами металлургического производства, обладают значительным ресурсным потенциалом и все чаще рассматриваются как перспективное резервное, заскладированное минеральное сырье [1]. Являясь потенциальными ресурсами, способными расширить минерально-сырьевую базу страны по черным, цветным, благородным металлам, техногенные образования весьма агрессивно воздействуют на природную среду, поэтому интерес к их переработке обусловлен не только коммерческими задачами, но и возросшими экологическими требованиями.

Горно-металлургическая отрасль обладает огромным потенциалом вторичных металлосодержащих ресурсов. Ежегодно в горно-металлургическом комплексе России образуется около 95 млн т металлургических шлаков, 15 млн т шламов черной металлургии, 197 млн т хвостов

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №13-05-00008).

обогащения, при этом со сточными водами безвозвратно теряются 23.1 тыс. т меди, до 50 тыс. т цинка, что подтверждает перспективность рынка техногенного сырья [2]. Следует отметить, что горно-металлургический комплекс, вследствие громадных твердых и жидких массопотоков, труднее других областей хозяйственной деятельности поддается технологическому совершенствованию. Эффективность комплексного использования минерального сырья, включая ликвидацию последствий его промышленной переработки, базирующейся на современных технологиях добычи и переработки, может способствовать решению этой проблемы.

Техногенное минеральное сырье — особый вид сырья, поэтому переработка его по существующим традиционным технологиям во многих случаях будет характеризоваться низкими показателями, невысокой рентабельностью и повторным образованием отходов. Для вовлечения в промышленную переработку сложного, труднообогатимого сырья необходимо установить закономерности влияния его строения, фазового состава, в том числе вторичной минерализации, физических и физико-химических свойств как отдельных минералов, так и руды в целом, обусловленных условиями их формирования и преобразования, на эффективность разделительных процессов для адаптации традиционных методов обогащения к техногенному сырью [3].

Из всего многообразия вовлекаемых в переработку техногенных образований основной объем составляют металлургические шлаки, образовавшиеся при переработке руд различного генезиса. Массовая доля полезных компонентов в шлаках часто превосходит массовую долю тех же компонентов в рудах черных и цветных металлов перспективных месторождений. В шлаковых отвалах 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 [4]. Металлургические шлаки в значительной степени отличаются от природных руд по вещественному составу и свойствам, поэтому при прогнозировании технологий их вторичной переработки необходимо располагать максимально полной информацией о составе и свойствах всех шлакообразующих фаз [5].

Опыт введения в промышленную эксплуатацию сырьевых объектов металлургических шлаков показал, что переработка такого нового для большинства металлургических и обогатительных предприятий сырья сталкивается с технологическими трудностями еще на стадии рудоподготовки. Используемое в операциях дробления и измельчения стандартное горнорудное оборудование имеет низкую селективность дезинтеграции при высоких энергетических затратах, не обеспечивает стабильности работы из-за частых простоев, что снижает технико-экономические показатели переработки шлаков и инвестиционную привлекательность этого вида техногенного сырья.

Для обеспечения комплексности и экономической целесообразности переработки металлургических шлаков назрела необходимость изучения их морфоструктурного состава и физико-механических свойств, определяющих способы рудоподготовки. Очевидно, что процессы дезинтеграции и схемы рудоподготовки труднообогатимого сырья должны быть адаптированы к его структурным особенностям и физико-механическим свойствам для достижения максимальной селективности раскрытия минералов с минимальными энергозатратами еще на стадии рудоподготовки и наиболее полного извлечения полезных минералов в последующих переделах обогащения.

Для оценки поведения шлаков под влиянием внешних нагрузок и обоснования наиболее рационального с точки зрения селективности и энергоемкости способа разрушения в аппаратах, реализующих различные схемы нагружения, необходима максимально полная информация

о фазовом (минеральном) составе шлаков, гранулярном составе, морфометрических особенностях, характере распределения рудных минералов и агрегатов, их физических свойствах (твердости, хрупкости и пр.).

Для этого проведено изучение фазового состава, структурных особенностей, физико-механических свойств шлаков различного генезиса: сталеплавильных шлаков ОАО “ММК”, медных шлаков ЗАО “Карабашмедь”, никелевых шлаков комбинатов “Североникель” и “Печенганикель”. Ресурсная оценка этих шлаков приведена в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Прогнозные ресурсы некоторых видов шлаков

Вид шлака (основной ценный компонент)	Объем запасов, млн т	Массовая доля ценного компонента, %
Сталеплавильные шлаки ОАО “ММК” (железо)	75.0	23.0 – 25.0
Отвальные никелевые шлаки ОАО “Североникель” (никель)	27.0	0.2 – 0.3
Текущие никелевые шлаки ОАО “Печенганикель” (никель)	23.0	0.2 – 0.3
Медные шлаки ЗАО “Карабашмедь” (медь)	20.0	5.0 – 6.5

Специфические особенности образования шлаков обуславливают их силикатный состав и присутствие необычных техногенных фаз, которые не встречаются в природе. В свою очередь от фазового состава шлаков зависит модуль их основности. Изучение фазового состава шлаков и особенностей их строения проводится комплексом минералого-аналитических методов (оптическая и электронная микроскопия и рентгенография). Виды и последовательность исследования обычно определяются его задачами.

В “Центре изучения природного вещества” (ИПКОН РАН, г. Москва) с помощью сканирующего электронного микроскопа Leo 1420 VP проведены исследования образцов шлаков ОАО “ММК», ЗАО “Карабашмедь”, комбинатов “Североникель” и “Печенганикель”. Качественный элементный анализ состава образца осуществляется установленным на микроскопе рентгеновским энергодисперсионным спектрометром INCA-300 (Oxford Instruments, Великобритания).

Изученные шлаки представляют собой преимущественно силикатные образования с неравномерной вкрапленностью рудных техногенных фаз. Так, сталеплавильные шлаки ОАО “ММК” сформированы силикатами и алюмосиликатами преимущественно кальция, среди которых преобладает алит ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), в подчиненном количестве присутствует мелилит $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO})$, представленные выделениями неправильной формы со сглаженными очертаниями. Более поздней фазой, вероятно, является кордиерит $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5\text{O}_{18})$, образовавшийся по ослабленным зонам (границам “зерен”), за счет чего имеет неправильную, заливообразную форму. Размер выделений кордиерита достигает 15 мкм. Иногда создается ложное впечатление, что кордиерит частично “обтекает” выделения алита. В шлакообразующей массе отмечаются немногочисленные рудные фазы каплевидной или близкой к ней формы в виде единичных вкрапленников размером 1 – 2 мкм, приуроченные в основном к алитовой составляющей (рис. 1).

В шлаках комбината “Североникель” матрица представлена алюмосиликатом кальция $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$. На рис. 2 четко фиксируются эвтектические колонии — структуры, состоящие из двух фаз, растущих совместно при их определенном кристаллоориентационном соответствии. Техногенные рудные фазы выполнены пирротинном, в структуру которого входит никель $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$, и цинковой шпинелью — ганитом $\text{ZnO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$. Пирротин присутствует в виде индивидуализированных округлых и эллипсоидальных выделений разного размера, вокруг которых в виде каймы образуется ганит.

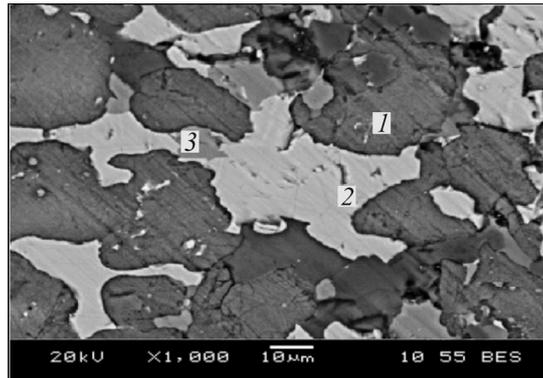


Рис. 1. Микрофотография и фазовый состав сталеплавильного шлака ОАО “ММК”: 1 — матрица — алит $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 2 — включения — мелилит $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$; 3 — перешейки замещения — кордиерит $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5\text{O}_{18})$

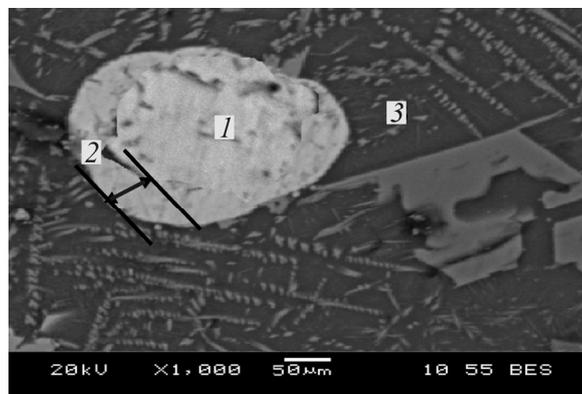


Рис. 2. Микрофотография и фазовый состав отвального никелевого шлака комбината “Североникель”: 1 — никеленосный пирротин; 2 — реакционная каемка — цинковая шпинель $\text{ZnO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; 3 — матрица — алюмосиликат $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ с примесями Zn, Cr, Al

Гранулированный никельсодержащий шлак комбината “Печенганикель” представляет собой стекловидное вещество, в различной степени насыщенное рудными техногенными фазами. Основной шлакообразующей фазой является цеолитоподобный алюмосиликат $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ (рис. 3). Наблюдается формирование ориентированной эвтектической структуры. Рудная фаза представлена пирротинном округлой формы разного размера, вокруг крупных выделений которого иногда отмечается прерывистая кайма ганита.

Металлургические шлаки ЗАО “Карабашмедь” сформированы фаялитом $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, в структуру которого, возможно, изоморфно входит цинк. Четко фиксируется техногенная структура фаялитовой матрицы, наблюдаются таблитчатые и пластинчатые зерна фаялита и панидиоморфные зерна вюстита. Также в шлакообразующей матрице идентифицируется силикат цинка — виллемит (Zn_2SiO_4). Шлаки отличаются значительным количеством рудных фаз, распределенных неравномерно и имеющих разные размеры. Медь присутствует в виде самородной меди и сульфидных минералов (халькопирит CuFeS_2 , борнит Cu_5FeS_4). Самородная медь имеет кубооктаэдрическую форму, размер выделений достигает 200 мкм в диаметре, нередко вокруг отмечаются ганитовые каемки. На долю сульфидных минералов приходится до 20 % меди от всего металла в шлаке. Они присутствуют в виде зерен практически идиоморфной или округлой формы размером 1 мкм и менее (рис. 4).

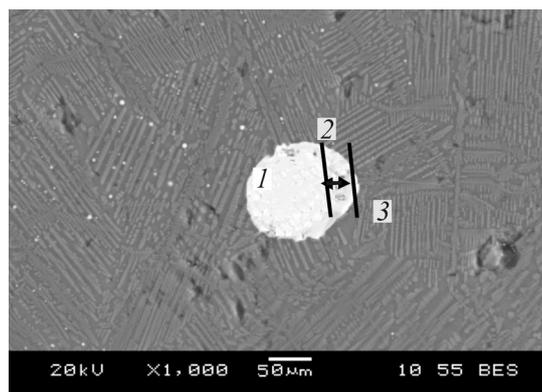


Рис. 3. Микрофотография и фазовый состав гранулированного никелевого шлака комбината “Печенганикель”: 1 — никеленосный пирротин; 2 — реакционная каемка — цинковая шпинель $ZnO \cdot Al_2O_3$; 3 — матрица — алюмосиликат $CaO \cdot 2Al_2O_3 \cdot SiO_2$ с примесями Zn, Cr, Al

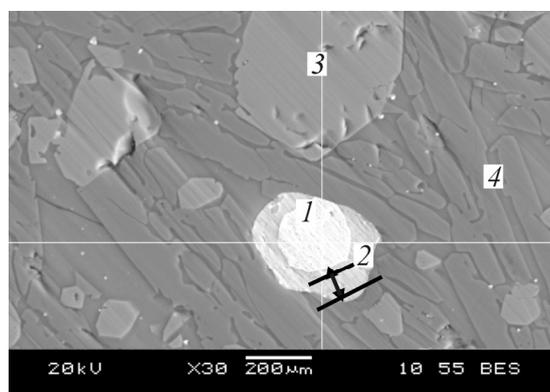


Рис. 4. Микрофотография и фазовый состав медного шлака ЗАО “Карабашмедь”: 1 — металлическая медь; 2 — цинковая шпинель $ZnO \cdot Al_2O_3$; 3 — матрица — фаялит $FeO \cdot SiO_2$ с примесями $2ZnO \cdot SiO_2$; 4 — вюстит FeO с примесями Zn, Cr, Al

Из изложенного следует, что шлаки сформированы в основном силикатными и алюмосиликатными фазами, содержащими петрогенные компоненты: кальций, магний, железо, хром. В сталеплавильных шлаках матрица отличается более сложным составом и в ней фиксируется более поздняя фаза, представленная кордиеритом. В шлаках цветной металлургии матрица может быть представлена как алюмосиликатными фазами переменного состава, так и железосодержащим оливином — фаялитом. Отличительной особенностью шлаков переработки цветных металлов является наличие эвтектических структур и присутствие ганита, механизм образования которого недостаточно ясен. Наличие индивидуализированных рудных фаз с четкими границами благоприятно влияет на их высвобождение из шлакообразующей матрицы при дезинтеграции.

Морфоструктурные параметры перерабатываемого сырья, к которым можно отнести массовый гранулярный состав рудных минералов, определяющий граничную крупность материала при дезинтеграции, морфометрические характеристики (фактор формы, удлинение), влияющие на их раскрываемость, предопределяют необходимую тонину помола при рудоподготовке, дальнейшие операции обогащения, их стадийность и позволяют прогнозировать концентрацию и перераспределение металлов в продуктах дезинтеграции. При изучении морфоструктурных параметров рудных минералов шлаков оптико-геометрическим методом (система анализа

изображений “SIAMS-600”) установлено (табл. 2), что они имеют фактор формы, близкий к 1 (0.7–0.92), свидетельствующий об изометричной (округлой) форме рудных выделений с четкими ровными границами. В шлаках не обнаружено сложных, в том числе эмульсионных, сростаний рудных минералов со шлакообразующей матрицей, снижающих эффективность обогащения. Размер (массовый гранулярный состав) рудных фаз варьирует от 60 до 352 мкм, неметаллические (шлаковообразующие) выделения имеют размер менее 500 мкм, их соотношение по средним размерам равно 0.2–0.6. Средний размер рудных зерен соответствует приемлемой крупности для современных гравитационных, флотационных и магнитных обогатительных аппаратов.

ТАБЛИЦА 2. Морфоструктурные параметры шлаков

Сталеплавильный шлак ОАО “ММК”	Никелевый шлак комбината “Североникель”	Никелевый шлак комбината “Печенганикель”	Медный шлак ЗАО “Карабашмедь”
Фактор формы рудных минералов			
CF = 0.74	CF = 0.89	CF = 0.81	CF = 0.92
Распределение размеров рудных минералов			
$D_{cp} = 84$ мкм	$D_{cp} = 63$	$D_{cp} = 127$	$D_{cp} = 352$ мкм

Существенное различие форм и размеров зерен рудных минералов и силикатной матрицы в исследуемых шлаках предопределяет их неодинаковое поведение при ударном нагружении, реализуемом в аппаратах центробежно-ударного дробления. Разрушение куска материала свободным ударом происходит наиболее селективно, по плоскостям срастания зерен минералов с наведением широкой сети микротрещин.

В аппаратах центробежно-ударного дробления происходит селективное разрушение техногенных фаз, обладающих различным сопротивлением удару — хрупкостью и твердостью. Металлургические шлаки, состоящие из силикатных фаз, армированных металлическими включениями (рудными минералами), являются композитным сырьем техногенного происхождения, что исключает возможность получения монообразцов компонентов шлака, а следовательно, и оценку прочностных свойств отдельных компонентов по стандартным методикам. Для количественного определения прочностных свойств основных фаз шлаков предложено использовать показатели “микрочрупкость” и “микротвердость”, устанавливаемые с помощью полуавтоматического микротвердомера ПТМ-3 [6]. Микротвердость шлакообразующих фаз определена методом вдавливания (метод Виккерса) [7].

Хрупкость минералов оценивалась по числу отпечатков с трещинами одного типа и от характера трещин. Суммарный балл хрупкости рассчитывался по формуле

$$Z_p = 0 \cdot n_0 + 1 \cdot n_1 + 2 \cdot n_2 + 3 \cdot n_3 + 4 \cdot n_4 + 5 \cdot n_5,$$

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

При изучении физико-механических свойств основных фаз шлаков установлены существенные различия микротвердости и микрохрупкости минеральных компонентов шлаков: микротвердость силикатной матрицы шлаков значительно выше микротвердости рудных фаз и соответственно равна 293–474 и 182–148 кг/мм² (табл. 3). Вполне закономерно, что оксидные фазы обладают более высокой микротвердостью по сравнению с силикатными.

ТАБЛИЦА 3. Микротвердость и микрохрупкость основных фаз шлаков

Вид шлака, фаза	Суммарный балл хрупкости	Микротвердость, кг/мм ²
Сталеплавильный шлак ОАО “ММК”:		
корольки металла	27	128
алит	45	512
кордиерит	101	805
мелилит	40	474
Никелевый шлак комбината “Североникель”:		
никеленосный пирротин	23	155
алюмосиликат с примесями Zn, Cr, Al	47	293
цинковая шпинель	106	778
оксиды Fe, Mn, Mg	34	365
Никелевый шлак комбината “Печенганикель”:		
никеленосный пирротин	22	142
алюмосиликат с примесями Zn, Cr, Al	42	326
цинковая шпинель	102	754
оксиды Fe, Mn, Mg	43	596
Медный шлак ЗАО “Карабашмедь”:		
металлическая медь	19	148
фаялит с примесями 2ZnO·SiO ₂	35	293
цинковая шпинель	102	754
вюстит с примесями Zn, Cr, Al	39	265

Микротвердости алюмосиликатных матриц никельсодержащих шлаков комбинатов “Североникель” и “Печенганикель” не равны и составляют для матрицы гранулированных шлаков 293 кг/мм², а микротвердость матрицы отвальных никелевых шлаков 326 кг/мм². Это можно объяснить как различием в скорости охлаждения шлаков, так и тем, что при длительном хранении на открытом воздухе шлаки подвержены воздействию окружающей среды, в результате которого происходит частичное разрушение и разупрочнение силикатов. Пониженная микротвердость фаялита, присутствующего в шлаках ЗАО “Карабашмедь”, составила 293 кг/мм², что объясняется длительным нахождением данных шлаков в отвалах и связанными с этим процессами гипергенеза, а также наличием ZnO в его составе. Микротвердость вюстита составила 265 кг/мм², что также объясняется особенностями техногенного состава данного минерала.

Повышенной хрупкостью обладают силикатные минералы шлаковых фаз (суммарный балл хрупкости 35–45) по сравнению с рудными минералами (суммарный балл хрупкости 19–27). Металлы обладают большей зоной пластической деформации, предшествующей разрушению,

по сравнению со шлакообразующими нерудными фазами и не склонны к хрупкому разрушению. Так, для никеленосного пирротина шлаков комбинатов “Североникель” и “Печенганикель” суммарный балл хрупкости составил 23 и 22 соответственно, а матрицы, представленной алюмосиликатом, — 47 и 42.

Наименее хрупкой металлической (рудной) фазой является фаза шлаков ЗАО “Карабаш-медь”, суммарный балл хрупкости этой фазы составил 19, а наибольшей хрупкостью в исследуемых шлаках обладают фазы ганитовых каемок, 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.

Хрупкость ганитовых каемок на периферии зерен рудных включений позволяет предположить, что при дезинтеграции первоначально будет разрушаться именно эта фаза. Структурная неоднородность металлургических шлаков, наличие структур замещения в виде каемок и различия в твердости и хрупкости отдельных фаз шлаков создают предпосылки для селективной дезинтеграции их в аппаратах центробежно-ударного дробления, в которых разрушение происходит за счет различия прочностных свойств компонентов и различного сопротивления удару.

Полученные данные и анализ способа разрушения материала в центробежно-ударных аппаратах позволяют рассмотреть модель куска шлака как неоднородный многокомпонентный материал — силикатная матрица с рассеянными металлическими (рудными) включениями, а в качестве критерия селективности дезинтеграции шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления принять соотношение микротвердости силикатной фазы H_M и металлических включений H_B шлака. Условия разрушения указанных фаз описываются выражениями для напряженного состояния, приведенными в работах [8, 9]. Напряжение во включениях рассчитывается по формуле

$$\sigma_B = \frac{\sigma_0}{\alpha} (1 + \mu_B \beta), \quad (1)$$

а напряжение в матрице

$$\sigma_M = \frac{\sigma_0}{\alpha} \frac{E_M}{E_B}. \quad (2)$$

В этих выражениях коэффициенты α и β , характеризующие физико-механические свойства компонентов материала, определяются следующим образом:

$$\alpha = \nu(1 - \mu_B \beta) - \frac{E_M}{E_B} (1 - \nu), \quad \beta = \frac{2E_M(\mu_B - \mu_M)}{E_B \left[1 + \mu_B + \frac{E_M}{E_B} (1 + \mu_B)(1 - 2\mu_B) \right]},$$

где E_M, E_B — модули упругости силикатной матрицы и включений, МПа; μ_M, μ_B — коэффициенты Пуассона; $\sigma_M^{np}, \sigma_B^{np}$ — предельные напряжения матрицы и включений, МПа; ν — объемная доля включений, доли ед., σ_0 — среднее осевое напряжение в структурном элементе, МПа.

Селективное разрушение рудных минералов произойдет при условии, что напряжения, создаваемые во включениях, будут равны или больше предельных напряжений (σ_B^{np}), необходимых для их разрушения, а напряжения, создаваемые в шлакообразующей матрице, меньше предельных напряжений (σ_M^{np}), необходимых для ее разрушения. С учетом выражений (1) и (2) разрушение минерала включения произойдет при выполнении условия

$$\frac{E_B \sigma_M^{pp}}{E_M \sigma_B^{pp}} \left[1 + \mu_B \frac{2 E_M (\mu_B - \mu_M)}{E_B \left[1 + \mu_M + \frac{E_M}{E_B} (1 + \mu_B)(1 - 2 \mu_B) \right]} \right] > 1 ,$$

разрушение вмещающего минерала — при выполнении условия

$$\frac{E_B \sigma_M^{pp}}{E_M \sigma_B^{pp}} \left[1 + \mu_B \frac{2 E_M (\mu_B - \mu_M)}{E_B \left[1 + \mu_M + \frac{E_M}{E_B} (1 + \mu_B)(1 - 2 \mu_B) \right]} \right] < 1 .$$

Анализируя приведенные условия, можно отметить, что характер разрушения в случае прочной связи на границе раздела минеральных фаз будет определяться как соотношением упругих свойств минералов (E_M / E_B , μ_M / μ_B), так и соотношением их прочностей ($\sigma_B^{pp} / \sigma_M^{pp}$).

Выразив из условий разрушения минерала включения отношение предельных значений напряжений матрицы и включения ($\sigma_M^{pp} / \sigma_B^{pp}$), получим неравенство, позволяющее определить, при каком соотношении физико-механических характеристик минеральных фаз материала произойдет селективное разрушение одной из них:

$$\frac{\sigma_M^{pp}}{\sigma_B^{pp}} > \frac{E_M}{E_B} \frac{1}{1 + \mu_B \frac{2 E_M (\mu_B - \mu_M)}{E_B (1 + \mu_M + \frac{E_M}{E_B} (1 + \mu_B)(1 - 2 \mu_M))}} .$$

Чтобы сузить множество значений, используемых в модели, применяются ограничения. Обозначив $\sigma_M^{pp} / \sigma_B^{pp} = y$, $E_M / E_B = x_1$, $\mu_B = x_2$ и $\mu_M = x_3$, получим функцию вида

$$y = \frac{x_1}{1 + 2x_1x_2 \frac{(x_2 - x_3)}{(1 + x_3 + x_1(1 + x_2)(1 - 2x_2))}} .$$

Поиск минимального положительного значения составленной функции при условии, что соотношение модулей упругости матрицы и включений для шлаков больше 1, а значение коэффициента Пуассона находится в пределах от 0 до 1, не включая крайние точки, показал, что минимальное значение функции равно 0.83. Тогда неравенство примет вид: $\sigma_M^{pp} / \sigma_B^{pp} > 0.83$.

В работах [10, 11] приведена зависимость микротвердости и прочности при сжатии $H \cong 22.5\sigma_{сж}$. Это прямая зависимость позволяет выразить отношение предельных напряжений сжатия силикатной матрицы и металлических включений через соотношение микротвердостей этих компонентов, а условие селективного разрушения куска шлака принимает вид $H_M / H_B > 0.83$.

Полученное соотношение микротвердости шпинельных фаз матрицы (H_M) и металлических включений (H_B) может служить критерием селективности дезинтеграции металлургических шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления. При $H_M / H_B > 0.83$ обеспечивается селективное разрушение минеральных фаз по границам их срастания.

Для оценки селективности дезинтеграции металлургических шлаков по данному критерию рассчитаны соотношения микротвердости матрицы и металлических включений:

Вид шлака	Отношение микротвердости матрицы и металлических включений
Шлак ОАО “ММК”	6.2
Шлак комбината “Североникель”	5.01
Шлак комбината “Печенганикель”	5.3
Шлак ЗАО “Карабашмедь”	5.09

ВЫВОДЫ

В исследуемых шлаках соотношение микротвердости матрицы и включений значительно больше установленного предельного значения 0.83, что свидетельствует о возможности селективного разрушения шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления по границам срастания зерен металлических включений и силикатной матрицы. Предложенный критерий может служить для экспрессной оценки характера дезинтеграции металлургических шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления ввиду того, что является простым как с точки зрения аппаратного обеспечения, так и с точки зрения трудоемкости выполняемых измерений.

Изучение морфоструктурных характеристик и физико-механических свойств техногенного сырья — шлаков черной и цветной металлургии различного генезиса — показало, что они представляют собой гетерогенный материал с резко различающимися свойствами и морфометрическими параметрами отдельных фаз. Это создает предпосылки селективного разрушения структурно неоднородных материалов в аппаратах центробежно-ударного дробления, так как именно такой способ дезинтеграции обеспечивает наиболее полное раскрытие сложных минеральных комплексов по границам срастания фаз, а следовательно, и более высокие показатели последующего обогащения труднообогатимого техногенного сырья. Физико-механические свойства и структурные параметры шлаков позволят в дальнейшем составить адекватную схему нагружения куска материала, обосновать механизм разрушения металлургических шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления и установить оптимальные параметры работы дробилок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шадрунова И. В., Савин А. Г., Волкова Н. А., Горлова О. Е. Технологические, экономические и экологические аспекты переработки техногенного сырья горно-металлургических предприятий Урала / Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов: тр. Междунар. конгр. — Екатеринбург: ООО “УИПЦ”, 2012.
2. Лотош В. Е. Переработка отходов природопользования. — Екатеринбург: УрГУПС, 2002.
3. 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.
4. Шадрунова И. В., Козин А. Ю., Воробьев В. В., Артамонов В. А., Колодежная Е. В. Прогнозная технологическая и ресурсная оценка шлаков цветной и черной металлургии / Материалы междунар. совещ. “Плаксинские чтения”. Ч. 2. — Апатиты: КНЦ РАН, 2007.

5. **Ожогина Е. Г., Броницкая Е. С., Ануфриева С. И. и др.** Анализ и выбор способов переработки металлургических шлаков // Цв. металлы. — 2002. — № 8.
6. **Шадрунова И. В., Копцева Н. В., Колодежная Е. В., Ефимова Ю. Ю.** Возможности использования компьютерной системы анализа изображений и методов испытания механических свойств для оценки эффективности переработки руд и техногенного сырья / Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007.
7. **Лебедева С. И.** Микротвердость минералов. — М.: Недра, 1977.
8. **Хопунов Э. А.** Исследование механизма селективного разрушения руд. — Л.: Механобр, 1987.
9. **Хуземанн К.** Критерии избирательного дробления прожилково-вкрапленных медно-молибденовых руд / Совершенствование процессов подготовки руд. — Л., 1980.
10. **Барон Л. И., Глатман Л. Б.** Контактная прочность горных пород. — М.: Недра, 1966.
11. **Протодьяконов М. М., Тедер Р. И., Ильницкая Е. И.** Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: справ. пособие. — М.: Недра, 1981.

Поступила в редакцию 18/VII 2013