

**Хопунов Э.А.**

**Теория и практика избирательной  
подготовки минерального и техногенного  
сырья**

**Москва  
Издательство Нобель Пресс**

УДК 55  
ББК 26.3  
Х78

X78      **Хопунов Э.А.**  
Теория и практика избирательной подготовки минерального и техногенного сырья / Хопунов Э.А. – М.: Lennex Corp, —  
Подготовка макета: Издательство Нобель Пресс, 2014. – 343 с.

**ISBN 978-5-519-02669-7**

Эксперимент, теория, практика - основное содержание книги, посвященной важной проблеме формирования энергосберегающих технологий переработки минерального сырья и техногенных материалов. Впервые представлен большой экспериментальный материал, показывающий: почему при измельчении тратится энергии в несколько раз больше, чем это необходимо. На примере множеств руд и техногенных материалов (кокс, агломерат, окатыши и др.) показана связь структурных, физико-механических свойств составляющих их компонентов и самих материалов с прочностными характеристиками и результатами разрушения. В полном объеме изложены теоретические и практические результаты применения магнитно-механических технологий для интенсификации процессов селективного разрушения, позволяющие открыть новые направления по созданию «магнитных мельниц» для раскрытия железных руд. Приведены материалы, позволяющие рассматривать буровзрывные работы в качестве необходимого элемента технологии рудоподготовки.

**ISBN 978-5-519-02669-7**

© Издательство Нобель Пресс, 2014  
© Хопунов Э.А., 2014

# Теория и практика избирательной рудоподготовки и переработки техногенного сырья

Э.А. Хопунов

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
1 ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТАДИЯХ РУДОПОДГОТОВКИ	10
1.1 Избирательное разрушение как частный случай структурной дезинтеграции	10
2 МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О РАСКРЫТИИ МИНЕРАЛОВ	15
2.1 Модели зарождения и роста трещин	15
3 СТРУКТУРА И ПРОЧНОСТЬ КАК ФАКТОРЫ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ	27
3.1 Генезис руд и минералов	27
3.2 Структуры границ срастания минералов	30
3.3 Поверхностные явления на границе срастания	35
3.4 Представления о прочность границ срастания	39
3.5 Структурные характеристики руд	47
4 УПРАВЛЯЕМЫЕ ФАКТОРЫ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ	53
4.1 Роль параметров нагружения в процессах разрушения	53
4.2 Роль волновых процессов в избирательном разрушении	67
4.3 Анализ процессов разрушения и устройств с позиций управляемых факторов разрушения	69
5 РУДОПОДГОТОВКА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ	77
5.1 Железные руды	77
5.1.1 Упругие и прочностные свойства минералов железных руд.	82
5.1.2 Оценка прочностных характеристик руд	93
5.1.3 Циклическое воздействие переменной нагрузкой	105
5.1.4 Прочность частиц неправильной формы	107
5.1.5 Сопоставление прочности частиц и спектра силовых воздействий в мельнице	114
5.1.6 Рудоподготовка при совместной переработке разновидностей	118
5.1.7 Влияние рудоподготовки на конечные стадии обогащения	128
5.2 Рудоподготовка при извлечении цветных и редких металлов	141
5.2.1 Руды цветных металлов	141
5.2.2 Руды редких металлов.	147
5.3 Хромитовые руды	166
5.4 АсBESTОВЫЕ руды	178
6 ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ	197
6.1 Лом абразивных материалов	197
6.2 Твердое топливо для доменного сырья	211
6.3 Металлургическое сырье	219
6.3.1 Аглоспек	219
6.3.2 Окатыши	240
7 МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ РАЗУПРОЧНЕНИЯ РУД	249
7.1 Применение магнитных полей для разупрочнения и разрушения руд	249
7.1.1 Обработка железных руд в нестационарных магнитных полях.	254
7.1.2 Измельчение руд в постоянном магнитном поле	266
7.2 Методы разупрочнения руд	288
7.2.1 Разрушения термическими напряжениями	288
7.2.2 Взрывные методы избирательной рудоподготовки	295
7.2.3 Технологии рудоподготовки с применением электрических полей	311
8 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РУДОПОДГОТОВКИ	318
9 КОНЦЕПЦИЯ ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ РУДОПОДГОТОВКИ И ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ	330
Литература	340

## ВВЕДЕНИЕ

Среди современной «суммы технологий» процессы переработки минерального сырья и техногенных материалов относятся к наиболее затратным, экологически «неблагополучным» производствам, в которые вовлечены огромные людские, финансовые и энергетические ресурсы. Достаточно сказать, что для получения одного грамма золота необходимо извлечь из недр Земли породу массой более, чем в сто тысяч раз превышающую конечный продукт, а для получения металлов, без которых не обходится ни один мобильный телефон или «планшетник» эту цифру можно умножить еще на несколько порядков. При этом значительная часть извлеченной породы остается на поверхности Земли в виде отвалов и хвостов, как правило, отрицательно влияющих на экологическую обстановку в регионах добычи и переработки. При анализе энергоэффективности технологий добычи и переработки минерального сырья, только ленивый не преминет указать на огромные энергозатраты, которые поглощают, чуть ли не 20% всей вырабатываемой в мире энергии, при этом полезно используемые продукты составляют лишь 2÷6% от извлеченной породы. Значительная часть добытой из Земли горной массы превращается в техногенные образования с меньшим содержанием извлекаемого продукта. Для добычи и переработки минерального сырья наиболее актуальными остаются две проблемы - высокий уровень энергозатрат и низкий уровень полноты использования всего добываемого из недр. Корень этих проблем в самих рудах, а точнее, в их структуре, форме вхождения и свойствах извлекаемых минералов, технологиях, которые применяются для их извлечения. Во всем мире для извлечения полезного продукта применяются «энергопожирающие» технологии, суть которых сводится к дезинтеграции (физическому или химическому разрушению связей между различными структурными компонентами руды) и применению различных методов сепарации, т.е. пространственному разделению минералов с разными потребительскими свойствами. Плата за высокое потребление энергии и низкий коэффициент использования извлеченного из недр сырья – это низкая эффективность технологий разрушения и не рациональное отношение к организации переработки различных видов сырья и антропогенных материалов.

Не соблюдение в процессах переработки минерального сырья принципов рациональной рудоподготовки: «не дробить и не обогащать ничего лишнего» приводит к избыточным энергозатратам, которые далеко не пропорциональны раскрытой поверхности минералов. Организация малоотходных (в идеале безотходных) технологий переработки руд тоже связана с избирательным разрушением (минеральный комплекс – это агрегат двух и более минералов). Реше-

ние этой задачи предполагает формирование потоков сырья для их предконцентрации (по извлекаемой группе минералов или минеральных комплексов) уже на ранних стадиях переработки руд. Современные проблемы безотходных технологий переработки техногенного сырья подробно рассмотрены в работах многих исследователей [1-5], поэтому далее они подробно не рассматриваются.

Сложившаяся практика дезинтеграции строится на принципах достижения нужной степени раскрытия, в основном, путем переизмельчения и существенного изменения исходного гранулометрического состава извлекаемых минералов относительно их структурных характеристик в руде. Раскрытие минералов путем простого сокращения размера куска сопровождается либо потерей извлекаемых элементов в хвостах, либо переизмельчением их в уже раскрытых зернах с соответствующими избыточными затратами энергии.

Развитие технологий обогащения неизбежно будет связано с распространением принципов избирательной рудоподготовки на наиболее энергоемкие стадии переработки сырья, предполагающие стадиальное формирование структурных элементов разделения и раскрытия. В данной работе вместо термина «селективный» мы будем придерживаться преимущественно русскоязычного термина «избирательный» как наиболее точно отражающего суть явления и процессов избирательной рудоподготовки. В этой связи, избирательное разрушение и разупрочнение рассматривается как органичный элемент на всех стадиях рудоподготовки, при этом на каждой стадии предусматривается предконцентрация структурных элементов разделения и формирование из них материальных потоков для раздельной дезинтеграции по адекватным режимам разрушения. В такой технологической последовательности формирование структурных элементов разделения и раскрытия осуществляется до получения всех товарных продуктов из исходного минерального сырья. Очевидно, что в данной схеме возникает необходимость контролировать и учитывать изменение состава и размеров структурных элементов для разных продуктовых потоков и на соответствующих стадиях переработки.

Не секрет, что существующая практика рудоподготовки, так или иначе, сопровождается переизмельчением извлекаемых минералов и вмещающих пород. В известной мере, это обстоятельство неизбежно при использовании существующего дробильно-измельчительного оборудования, не адаптированного для разрушения руд с широким гранулометрическим составом (от сотых долей до нескольких миллиметров). Полное освобождение минерала (раскрытие) путем простого сокращения размера куска в таких процессах возможно лишь при измельчении его до крупности наименьшего размера минерального зерна, т.е. за

счет переизмельчения и лишних затрат энергии. На заре добычи и обработки «камня» разрушение руд могло быть выборочным (избирательным), поскольку ручная добыча и обработка поневоле заставляла человека не дробить ничего лишнего. Рост объемов переработки полезных ископаемых привел к появлению машин, в которых принципы избирательного разрушения были заменены более производительными процессами многократного и множественного сокращения размеров измельчаемого куска. На этих принципах сформировался целый класс дробильно-измельчительного оборудования, который и по сей день несет на себе всю тяжесть переработки минерального сырья. Вместе с тем, как показывает практика, избирательное разрушение - это не только проблема обогатителей, есть масса технологий, которые требуют аналогичного подхода. Например, для доменного производства требуется кокс достаточно узкого грансостава. Для его разрушения также применяются традиционные схемы сокращения крупности, в результате образуется большое количество мелких фракций не пригодных для доменного производства (пыль выдувается из домны воздушными потоками), появляются экологические проблемы и бесполезно потраченные энергоресурсы на «производство» этой «вредной» мелочи. Другой пример - агломерационное производство, в котором для выплавки чугуна требуется доменный продукт в виде узкой фракции  $-40+5$  мм. Из аглоспека толщиной около полуметра и длинной несколько метров получить данную фракцию с минимальным переизмельчением (мелкая фракция - это тоже потерянные энергоресурсы) без применения технологий избирательного разрушения вряд ли возможно. В дорожно-строительной индустрии требуется щебень определенного грансостава и заданной геометрии кусков – это тоже задача избирательного разрушения с формированием заданной геометрии продуктов разрушения. Для решения задач комплексной переработки минерального сырья также необходимо избирательное разрушение горной массы, обеспечивающее подготовку к раскрытию и обогащению широкой группы извлекаемых минералов. Как видим, задача избирательного разрушения - это проблема не только обогащения руд, но и множества технологий, связанных с добычей, переработкой и производством минерально-го и техногенного сырья в различных отраслях промышленности.

Отметим еще на один аспект этой проблемы: избирательное разрушение при обогащении руд - это не только техническая задача, но и экономическая. Локальные решения по оптимизации затрат (материальных, энергетических, финансовых) на том или ином этапе переработки неизбежно потребуют перераспределения этих ресурсов по другим переделам, начиная с взрывной отбойки при добыче, заканчивая получением конечного продукта. Наглядный при-

мер: увеличение затрат на стадии буровзрывных работ при добыче горной массы (за счет повышенного расхода взрывчатых веществ, числа скважин и т.п.) приводит к снижению энергозатрат на дробление и измельчение и экономическому эффекту на данном переделе. Однако эта экономия ресурсов никак не относится с затратами первичного передела (буровзрывными работами), поскольку это разные производства. Второй момент - затраты и доходы при переработке минерального сырья необходимо соотносить с фактической стоимостью разрабатываемого участка недр, которые, как правило, принадлежат государству. В настоящее время известна практически вся линейка продуктов, получаемых из извлекаемого минерального сырья, и обладающих различной потребительской стоимостью для металлургии, строительной, дорожной и других отраслей промышленности. Известны прогнозные оценки потребления того или иного сырья (на региональном и мировом уровне), существуют методики, позволяющие прогнозировать стоимостные показатели сырья и конечных продуктов (концентратов, металлов и т.п.) на обозримый период. Практически отсутствуют методологические и вычислительные проблемы с оценкой фундаментальной стоимости месторождений (вновь открываемых или при доразведке действующих). Таким образом, горная порода, извлеченная из недр, из категории геологической неизбежно переходит в категорию экономическую, имеющую свою исходную стоимость. Термин «обогащение минерального сырья» - характеризующий процесс концентрирования извлекаемых компонентов в конечные продукты, приобретает иной - экономический смысл. В этом случае показателем рационального природопользования может стать степень «обогащения» как количественная мера превращения потенциальной стоимости минерального сырья в недрах в стоимость извлеченных промышленно используемых продуктов. Этот критерий, который численно можно оценивать отношением полученной прибыли от реализации извлеченных продуктов к стоимости всего месторождения, логично применять не только на стадии инвестиционного проектирования, но и при мониторинге разработки месторождения.

В развитие идей основоположников рационального природопользования и комплексного использования недр Б.Н. Ласкорина, Н.В. Мельникова, В.И. Ревнивцева, В.А. Чантурия и других ученых [3,4,5], в работе рассмотрен еще один аспект этой проблемы, связанный с формированием структурных элементов разделения и раскрытия на разных стадиях избирательной подготовки перерабатываемых материалов. Основная часть рассматриваемой проблемы, так или иначе, связана с разрушением минерального сырья и разделением его на потоки полиминеральных фрагментов, содержащих извлекаемые минералы. В таком

подходе избирательное разрушение рассматривается как необходимая стадия подготовки сырья с целью выделения некоторого структурного элемента. Последующее формирование из этих элементов соответствующих потоков для предконцентрации осуществляется традиционными методами, например, магнитной, радиометрической сепарации и иными современными методами сухого обогащения. В такой цепи продукты первичных стадий подготовки являются сырьем для последующих переделов по концентрированию извлекаемых минералов. Эта последовательность формирования структурных элементов раскрытия и разделения продолжается до получения всех товарных продуктов, изначально содержащихся в добываемом минеральном сырье. Общим для этих процессов является то, что на каждой последующей стадии структурный элемент раскрытия и разделения имеет меньший размер, более простую структуру и большее содержание извлекаемых минералов в каждом разделяемом потоке.

В реализации данного подхода к избирательной рудоподготовке существенная роль принадлежит технологической минералогии, однако диапазон решаемых ею задач предстоит несколько расширить и дополнить новыми информационными блоками:

- описанием минерального комплекса месторождения в виде суммы конечных продуктов для конкретных отраслей промышленности;
- вариантами моделей технологических схем разделения горной массы на составляющие минеральные комплексы с получением на выходе товарных продуктов;
- принципиальными схемами (на основе моделей) переработки минерального сырья с извлечением всех добываемых компонентов и доведением их до товарного, промышленного полезного продукта, например, для производства металла, керамики, стекла, кирпича, для дорожно-строительных работ (щебень, пески), в том числе и продуктов для заполнения шахтных выработок и карьеров;
- экономическим обоснованием выбора технологий сквозного и комплексного извлечения и переработки минерального сырья: подземное или кучное выщелачивание, механические, химические, биометаллургические или иные технологии.

Рациональная технология переработки минерального и техногенного сырья предполагает необходимость дополнения основного принципа классиков переработки сырья «не дробить и не обогащать лишнего» еще одним: «не добывать лишнего, а все, что извлечено из недр, применить с пользой». Если на данном временном отрезке у собственника или государства нет технологической воз-

можности применить и использовать все извлеченное из недр сырье, ему необходимо придать вид отложенного промпродукта или выставить на рынок с учетом его стоимости. Следует иметь в виду, что с появлением новых технологий и насыщения рынка традиционными видами сырья, постоянно меняется структура и динамика потребления минеральных ресурсов, происходит перераспределение объемов потребления между различными видами сырья. С развитием технологий, основанных на биологических и квантовых принципах, на уровне отдельных атомов и молекул (наноуровень), возрастет потребность в редких и редкоземельных элементах, что в будущем может привести к сокращению объемов производства традиционных цветных и черных металлов. Это может изменить взгляд на технологию добычи и переработки минерального и техногенного сырья: обратить большее внимание на селективную добычу с использованием геохимических, биологических и иных современных технологий локального извлечения нужных компонентов без масштабного вскрытия месторождения и образования огромных карьеров, пустот от подземных выработок, «гор» отвалов и техногенных месторождений.

Спрашивается, какая связь между экономикой извлечения сырья и избирательным разрушением. Ответ на поверхности - это энергозатраты, которые в стоимости товарного продукта составляют основную долю: только в рудоподготовке они могут достигать 80%. С экономической точки зрения любой добывший кусок горной породы, извлеченный из недр, обладает стоимостью, поскольку на его извлечение потрачены энергетические, материальные и финансовые ресурсы. Применение технологий селективной добычи или подземного выщелачивания должно быть обоснованным выводом технологической минералогии на базе комплексного анализа свойств руд и экономических моделей извлечения того или иного элемента.

Таким образом, у избирательной рудоподготовки появляется еще одно направление – она становится инструментом в организации малоотходных технологий и рационального недропользования, который предполагает существенное обновление взглядов на процессы переработки, в том числе техногенного сырья и материалов. Исторически сложилось так, что классическая рудоподготовка нацелена на предконцентрацию одного-двух извлекаемых компонентов. Применимые для этого методы, например, радиометрического обогащения основаны на контрасте реакции минерального сырья на внешний источник возбуждения или излучения, физически проявляющейся в параметрах поглощения, отражения или индуцированного излучения, при этом отбор осуществляется в основном по содержанию полезного компонента с отбрасыванием «балласта».

Вместе с тем, чувствительность современных радиометрических технологий позволяет расширить рамки этого метода предконцентрации практически на все минералы и минеральные комплексы горной массы с целью разделения их на различные продуктовые потоки для дальнейшей доводки специализированными методами до товарных продуктов. Радиометрические технологии обладают широким спектром распознавания минералов, этот факт делает их мощным инструментом в схемах рациональной рудоподготовки практически любого сырья, поскольку в комплексе с разными излучателями они могут быть настроены на распознавание практически любого минерала по фундаментальным ядерно-физическими характеристикам, особенно на первых стадиях разделения горной массы на продуктовые потоки, когда контрасты по другим параметрам еще не так явно выражены.

Технологии сепарации активно совершенствуются, главным образом за счет появления новых аппаратов и устройств, средств контроля состава сырья и автоматизации процессов разделения, чего нельзя сказать о второй составляющей процессов рудоподготовки - дезинтеграции. В этой связи в книге основное внимание уделено проблемам этой составляющей процессов переработки минерального и техногенного сырья. Задачей настоящего издания является еще одна попытка ответить на вопрос: как сделать так, чтобы «не дробить ничего лишнего» и не тратить энергии сверх того, что физически необходимо и достаточно для того, чтобы добытую горную массу превратить в совокупность ценных продуктов, актуализировать поиск новых технологий переработки. Для этого необходимо ответить на несколько вопросов.

1. Какова степень влияния консервативных факторов, сформированных природой, и на которые технолог не может повлиять:

- роль границ срастания минералов в конечном результате разрушения;
- роль структуры руды в определении границ применения механических методов дезинтеграции;
- влияние физико-механических свойств минералов слагающих разрушающую породу на раскрытие извлекаемых компонентов.

2. Какова роль оперативных факторов:

- вида и типа деформирования на характер разрушения материалов;
- внешних воздействий для изменения прочностных характеристик и улучшения раскрытия.

3. Наконец, ответить на главный вопрос, почему с ростом тонины помола энергозатраты на дезинтеграцию растут, в то время как физически энергия разрушения уменьшается с уменьшением размера разрушенного зерна.

Понимание роли этой совокупности факторов позволит проектантам и технологам более осознанно подходить к моделированию и выбору рациональных схем переработки руд и техногенных материалов, подбору оборудования, выбору режима разрушения, к обоснованию размера куска, с которого целесообразно начинать и заканчивать раскрытие минералов механическими методами и т.п. Эти знания позволяют обоснованно отказаться от экономически невыгодных механических способов дезинтеграции некоторых типов руд, побудят искать иные способы вскрытия минерального сырья и извлечения ценных компонентов.

# **1 Основные представления о стадиях рудоподготовки**

## **1.1 Избирательное разрушение как частный случай структурной дезинтеграции**

В современных технологиях переработки минерального и техногенного сырья процессы подготовки (рудоподготовки) включают в себя две основные технологические операции: дезинтеграцию на составляющие или структурные компоненты и сепарацию компонентов сырья по различным параметрам. Эффективность процесса в целом можно оценить по трем критериям: качество конечного товарного продукта, производительность и энергоемкость. Основным энергопотребителем в этой технологической связке является дезинтеграция, поэтому поиск путей организации рациональной рудоподготовки на базе принципов избирательного разрушения следует искать именно в данном технологическом переделе. Под избирательным разрушением, включающим в себя дезинтеграцию материала при дроблении или измельчении, принято понимать целенаправленное и управляемое изменение размеров, формы объекта или разделение многокомпонентного тела на его составляющие. Данное определение на больших масштабных уровнях перекликается с селективной добычей, т.е. направленным извлечением из массива пород горной массы, содержащей преимущественно извлекаемый минерал. В обширной практике дробления и измельчения материалов можно выделить несколько видов разрушения в зависимости от вида объекта, от назначения и направления использования продуктов разрушения.

**1. Избирательное разрушение по разделительным характеристикам.** Применяется в процессах рудоподготовки для последующего концентрирования раскрытия минералов в технологиях обогащения, при этом данный вид разрушения можно определить как избирательное раскрытие или освобождение, например, рудных минералов из вмещающих пород. Для обеспечения максимального извлечения металла в процессе обогащения требуется физически (или химически) отделить извлекаемый минерал от вмещающих пород, т.е. раскрыть (освободить) минералы, содержащие извлекаемый металл. В англоязычной научной литературе процесс раскрытия называется *liberation* – освобождение. Применительно к раскрытию минералов понятие «избирательное» требует дополнительных пояснений. Избирательное раскрытие предполагает либо освобождение минералов преимущественно по границам их срастания и сохранение гранулометрического состава исходной структуры руды, либо освобождение извлекаемого минерала от посторонних включений с разрушением минерала-матрицы преимущественно по границам раздела. Следует отметить, что в силу огромного структурного многообразия руд, идеальное избирательное рас-