

УДК 622.7

**И.В. Шадрюнова, Е.В. Колодежная**

## **К ВЫБОРУ СХЕМЫ СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОРОДЫ ПРИ ИНЕРЦИОННОМ РАЗРУШЕНИИ**

*Предложена методика построения схемы нагружения с учетом распределенного характера инерционных нагрузок и определения необходимых ускорений, позволяющая более адекватно представлять физику силового взаимодействия и определять параметры инерционных дробилок рациональным образом.*

*Ключевые слова: дробление, рудное сырье, рудоподготовка, обогащение, переизмельчение, нагружение.*

---

**О**дной из основных задач процессов подготовки руд к обогащению является обеспечение максимально возможной степени селективности раскрытия рудных минералов, освобождение их от минералов пустой породы. Этой основной цели подчинены современные направления развития процессов дробления-измельчения рудного сырья.

Рудоподготовка является наиболее дорогостоящим и энергоемким процессом в общей схеме обогащения (капитальные затраты достигают 50 %, эксплуатационные — 60 % от суммы всех затрат, расход электроэнергии составляет 40—65 % от общего расхода). Эффективность дезинтеграции в значительной степени зависит от селективности процесса, применения рационального оборудования и оптимального режима его работы.

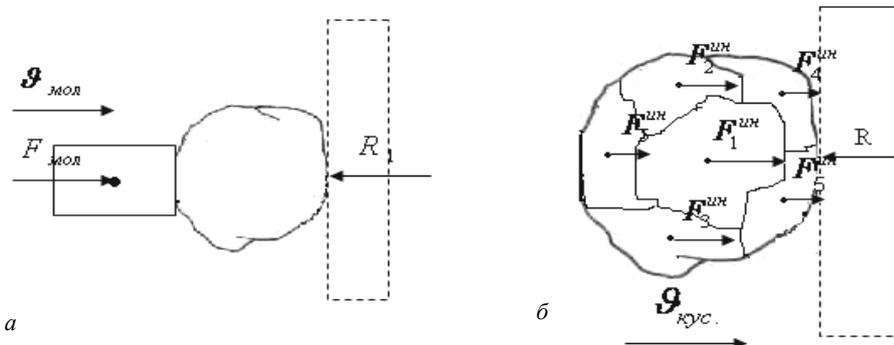
Актуальность совершенствования рудоподготовки диктуется изменением характера рудной базы отрасли: во всех рудах продолжает снижаться исходное содержание металлов, вовлекаются в переработку новые ранее не используемые виды сырья с тонкой вкрапленностью полезных компонен-

тов. В связи с этим перспективы развития агрегатов для подготовки сырья связаны, главным образом, с созданием и применением технологий переработки полезных ископаемых обеспечивающих комплексное извлечение и утилизацию отходов [1].

Основными направлениями развития технологий дробления и измельчения являются снижение крупности продуктов дробления путем совершенствования конструктивных и кинематических параметров дробилок, повышение производительности существующих агрегатов.

Эффективность процесса дробления предусматривает получение максимально большей вновь образованной поверхности на единицу затраченной энергии. При этом для эффективного процесса обогащения необходимо обеспечить высвобождение минералов из сростков при минимальной вновь образованной поверхности, то есть без переизмельчения.

Для селективного раскрытия минералов необходимо минимизировать нагрузки, прилагаемые к измельчаемому материалу. Избыточное нагру-



**Рис. 1. Схема расчета соответствующая инерционным дробилкам:**  $F_i^{ин}$  — векторы силы инерции отдельных зерен куска материала;  $F_{мол}$  — вектор силы с которой молоток действует на кусок;  $v_{мол}$  — скорость движения молотка;  $v_{кус}$  — скорость движения куска до удара;  $R$  — реакция опоры

жение приводит к переизмельчению ценного компонента руд и, как результат, к переводу его в шламы, не поддающиеся обогащению. В основе расчета всех машин, в том числе и для дробления породы, лежит создание необходимой технологической нагрузки. Определяющим фактором при разрушении породы на более мелкие фракции является не только величина, но и схема приложения нагрузок. При этом наибольший эффект достигается по схеме обеспечивающей создание наиболее эффективных внутренних напряжений, т.е. создание такой совокупности нормальных и касательных напряжений, которые более действенны при данном строении и состоянии породы.

В настоящее время для дезинтеграции применяются в основном щековые, валковые и роторные дробилки. Данные агрегаты имеют низкую селективность при высоких энергозатратах. Расчет конструктивных параметров таких дробилок базируется на создании в породе внутренних напряжений, для определения которых используется схема нагружения представленная на рис. 1, а. При таком нагружении, предполагается что

внутри тела возникают только нормальные напряжения вызванные сжатием. Разрушение следует ожидать лишь в зоне лежащей вблизи прямой соединяющей силы  $F$  и  $R$ .

В общем случае частица руды может быть разрушена в результате воздействия на нее усилий или их комбинаций, обеспечивающих: сжатие, растяжение, раскалывание, сдвиг.

Рассмотрим условия нагружения куска руды. В соответствии с принятой классификацией, по способу приложения нагрузки к породе, выделяется группа «ударные» [2]. В настоящее время расчет внутренних напряжений в породе основывается на той же схеме силового взаимодействия породе — инструмент, что и в щековых дробилках (см. рис. 1, а). Однако в отличие от щековых дробилок, где активным элементом является инструмент, в дробилках ударного действия силовые взаимодействия обусловлены торможением породы на инструменте. В этом случае внешними силами, обеспечивающими разрушение, являются силы  $F_i^{ин}$  инерции возникающие в породе при резкой остановке на поверхности камеры дробления. Силы инер-

ции приложенные к выделенным фрагментам определяется по формуле:

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

где  $V_i$  — объем фрагмента,  $m^3$ ;  $\rho_i$  — плотность  $kg/m^3$ ;  $a_{ост}$  — ускорение при торможении  $m/c^2$ .

Схема нагружения, соответствующая ударным дробилкам представлена на рис. 1. б. При составлении схемы нагружения использовались следующие положения:

1. Руда представляется в виде совокупности различных фрагментов постоянного объема и плотности.

2. Внутри руды, при взаимодействии с инструментом, возникают силы инерции приложенные в центре тяжести фрагментов.

3. Предельные напряжения внутри руды происходят по плоскостям концентрации напряжений, дефектов структуры и трещинам.

В соответствии с принятой моделью в теле возникают как нормальные напряжения, обусловленные сжатием  $\sigma_{сж}$ , так и нормальные напряжения, вызванные изгибом  $\sigma_{из}$ . При этом интенсивность последних может превышает  $\sigma_{сж}$ . Зона действия напряжений значительно расширяется. Следовательно, вероятность разрушения по трещинам находящимся в зоне действия сил повышается. Данное обстоятельство, при прочих равных условиях, позволяет обеспечить разрушение породы при более низких значениях ускорений, а следовательно и меньших энергетических затратах.

Предложенную методику использовали для расчета условий необходимых для разрушения шлаков черной металлургии, представляющего собой образец техногенного сырья. Шлаки — это сложные сплавы компонентов, находящихся в состоянии ионной диссоциации. В процессе шлакообра-

зования происходит запутывание мельчайших капелек металла или штейна в шлаковой структуре. После затвердевания шлак представляет собой камень или стекловидное тело. Переработка твердых шлаков реализуется, как правило, в холодном состоянии за счет механического воздействия, включающего поэтапное дробление шлака на аппаратах, работающих на принципах сжатия и сдвига (шековые и валковые дробилки). Однако, при это не обеспечивается полнота извлечения металлов из шлаков из-за недостаточного раскрытия сростков минеральных фаз, переизмельчения.

С целью повышения качества подготовки шлаков к дальнейшей переработке целесообразно использовать инерционные дробилки.

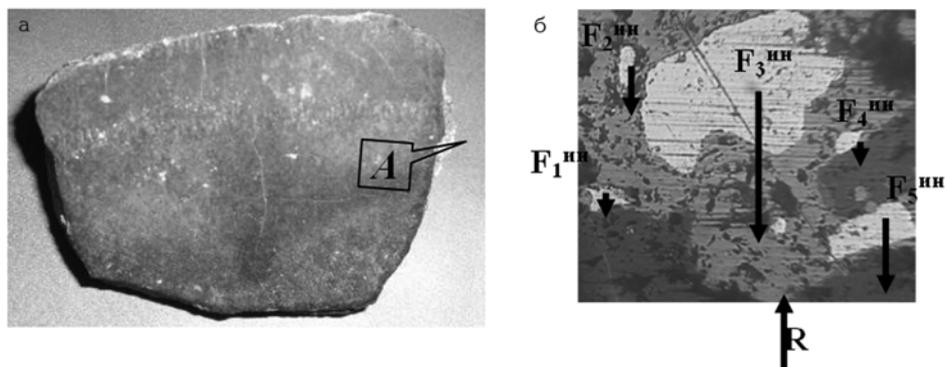
Для определения условий нагружения и расчета внутренних напряжений было выполнено предварительное изучение шлаков доменного, мартеновского и конверторного производств ОАО ММК. Были определены соотношения морфометрических параметров:

- размеры металлических включений находятся в пределах от 50 до 100 мкм, а неметаллических включений от 500 мкм до нескольких миллиметров. Содержание металла в шлаке 23—25 %, в том числе в виде металлических корольков 10-15 %.

- круглый фактор формы металлических включений составляет 0,68—0,87, а неметаллических включений — 0,34—0,51 с вероятностью частоты обнаружения до 90 %.

Плотность металла и шлаковой составляющей кусков шлака значительно отличаются и имеет значения для металла 7,7—7,9  $г/см^3$ , для шлаковой составляющей в среднем 3,3  $г/см^3$ .

Среднее значение микротвердости металлических включений составило



**Рис. 2.** а — кусок шлака поступающий на дробление; б — фрагмент области А при 200 кратном увеличении

1282 МПа; а неметаллических включений — 4743 МПа для темного компонента и 5123 МПа для светлого компонента. Ударная вязкость образца шлака  $37,5 \text{ Дж/см}^2$ , железа (сталь 3) —  $138 \text{ Дж/см}^2$ . Что свидетельствует о различном сопротивлении удару основных компонентов шлака. Такое строение кусков шлака позволяет применить к анализу силового взаимодействия при разрушении на дробилках центробежно-ударного действия предложенную схему рис. 1, б.

Представленная на рис. 2, б дискретизация области позволяет определить напряжения и деформации, а следовательно и ускорения необходимые для разрушения куска материала методом конечных элементов [3].

Был использован метод конечных элементов реализованный в программном комплексе FEM. Данная программа позволяет проводить дискретизацию области деформирования; задавать упругие и прочностные свойства элементов, граничные и начальные условия решаемой задачи и собственно решения задачи. Результаты расчетов могут быть визуализированы.

В основе расчета лежит разделение сплошной среды на отдельные равные конечные элементы, имеющие форму квадратных четырехуголь-

ников. В последствии производится объединение рядом стоящих элементов с совпадающими свойствами в моноблоки — зерна. Описание фрагмента включает в себя: модуль деформации (МПа), коэффициент Пуассона, плотность среды ( $\text{т/м}^3$ ), начальный угол внутреннего трения (град), начальное сцепление (МПа), начальная прочность на растяжение (МПа.), а также остаточные прочностные характеристики (угол трения и сцепление, прочность на растяжение), минимально возможный модуль деформации этой среды и число 1, обозначающее этот тип сред. Всего 11 параметров.

Силовые факторы обусловлены величиной ускорения  $a_{\text{ост}}$  и массой зерен. Напряжения возникающие на границах зерен зависят от постоянных характеристик, представленных в описании зерен. Программа позволяет определять предельные напряжения, при которых происходит разрушение по границам зерен в зависимости от характеристики структуры шлака и ускорение торможения. Варьируя величину  $a_{\text{ост}}$  определялась его величина, при которой действующие напряжения превышают предельные на границах фрагментов. По значению  $a_{\text{ост}}$  на основе стандартной методики опреде-

ляются геометрические и силовые параметры ударной дробилки.

Предложенная методика построения схемы нагружения с учетом распределенного характера инерционных нагрузок и определе-

ния необходимых ускорений позволяет более адекватно представлять физику силового взаимодействия и определять параметры инерционных дробилок рациональным образом.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геологоразведочных работ. Материалы первого Российского семинара по технологической минералогии.* Петрозаводск 2006. — с. 18

2. *Абрамов А.А.* Переработка и обогащение и комплексное использование твер-

дых полезных ископаемых. Т 1. Обогачительные процессы и аппараты: Учебник для ВУЗов. — М.: Издательство Московского государственного горного университета. 2001. — 117 с.

3. *Норри Д., де Фриз Ж.* Введение в метод конечных элементов: Пер с англ. — М.: Мир. 1981. — 255 с. **ГИАБ**

---

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Шадрунова Ирина Владимировна* – доктор технических наук, ИПКОН РАН, shadrunova@mail.ru

*Колодежная Екатерина Владимировна* — аспирант, ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический Университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск



---

## РУКОПИСИ,

## ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ ГОРНАЯ КНИГА

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФФУЗИОННОЙ МОДЕЛИ (829/07-11 от 12.05.11) 37 с

*Певзнер Л.Д.*, д-р техн. наук, проф., *Костиков В.Г.*, д-р техн. наук, проф., *Летиев О.А.*, асп. каф. АТ, Московский государственный горный университет, *Костиков Р.В.*, ведущий специалист «АБН»

*Разработана математическая модель процесса рудоизмельчения и ее решение, которое может быть использовано для оценки выхода продукта необходимого класса. Приводится анализ литературы, а также рассмотрены различные пути автоматизации процесса измельчения. Кроме того, предложен упрощенный вариант решения уравнения диффузии, более приемлемый на практике для создания на его основе математической модели процесса рудоизмельчения.*

*Ключевые слова:* руда, математическая модель, рудоподготовка, уравнение диффузии.

### RESEARCH OF ORE CRUSHING PROCESS BY MEANS OF DIFFUSIVE MODEL

*Pevzner L.D., Kostikov V.G., Letiev O.A., Kostikov R.V.*

*The present paper is devoted to development of a mathematical model of ore preparation process and to its decision which can be used for an estimation of a product yield of a necessary class. The literature analysis is resulted, and also various ways of crushing process automation are considered. The simplified candidate solution of a diffusion equation more comprehensible in practice for creation on its basis of a mathematical model of ore preparation process is besides offered.*

*Key words: ore, mathematical model, ore preparation, diffusion equation.*