© В.Н. Анисимов, А.Р. Смольяков, 2007

УДК 622.224:622.341

В.Н. Анисимов, А.Р. Смольяков

АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ОДНОВРЕМЕННЫХ УПРУГИХ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РУДОПОДГОТОВКЕ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ

Рудоподготовка является до настоящего времени самым энергоемким и дорогим процессом в технологии обогащения минерального сырья, имеющим к тому же и самый низкий коэффициент полезного действия, который у измельчающего оборудования чаще всего не превышает 1,5-2 %. Кроме того, процедура рудоподготовки, если она проведена не эффективно, может значительно увеличить расходы и на последующие операции обогащения и привести к необоснованным потерям ценных компонентов.

Основные энергозатраты, например, на железорудных ГОКах, приходятся на процессы разрушения руды — бурение, взрывание, дробление, измельчение — и достигают 31-32 кВт·ч/т руды, в том числе 26-27 кВт·ч/т приходится на измельчение руды в мельницах. На процессы разрушения руды приходится около 60 % общих энергозатрат на производство конечного продукта, в том числе на измельчение руды в мельницах — около 50 %. В себестоимости железорудного концентрата процессы измельчения руды в мельницах составляют около 50 % [1]. В связи с тенденциями снижения содержания железа в руде и повышения цен на энергоносители составляющая энергозатрат в себестоимости железорудного концентрата и окатышей повышается, что делает проблему снижения энергозатрат всё более актуальной. Попытки решения этой проблемы путем дальнейшего совершенствования механических аппаратов, применяемых для сокращения крупности горных пород, дают незначительные результаты и в принципе не могут кардинально улучшить ситуацию.

Сегодня предлагаемый метод, приведенный в работе [2] может быть эффективен, например, для размагничивания и разделения флоккул перед магнитной сепарацией, но не может принципиально оказать сколь либо существенного влияния на снижение уже вложенных энергозатрат существующей традиционной технологической схемы передела руды. Сегодня в концептуальном плане практический интерес может представлять создание малооперационнной ресурсосберегающей технологии уже в процессе взрывной рудоподготовки с использованием дополнительного воздействия ЭМП на свойства массива (снижение прочностных свойств), еще на стадии ведения буровзрывных работ, на долю которых приходится всего до 6 % энергозатрат передела.

Сопоставление основных особенностей различных способов рудоподготовки (воздействия на руду) позволяет отметить, что наиболее технологичным в настоящее время пока остается взрыв-

ной способ нагружения, которому руда подвергается уже в процессе ее взрывной отбойки от массива в карьере или руднике.

Взрывное нагружение позволяет обеспечить необходимую интенсивность и кратность нагрузок, высокую скорость их приложения, способствующую снижению пластических деформаций и соответствующих потерь энергии, то есть отвечает основным требованиям рациональной организации процесса раскрытия минералов. Несмотря на достаточно низкий КПД взрыва (3-5 % по оценке ряда авторов) для осуществления этого способа воздействия не требуется создание дополнительных энергоемких установок и устройств, он не усложняет технологию рудоподготовки.

Процесс рудоподготовки должен быть организован так, чтобы обеспечить раскрытие извлекаемых минералов при оптимальном измельчении руды. В связи с этим разработка новых энергосберегающих методов воздействия на минеральное сырьё, позволяющих повысить эффективность процессов измельчения и раскрытия ценных компонентов и снизить удельные энергозатраты на процессы разрушения, является актуальной задачей.

В широко применяемых в промышленности дробилках и мельницах куски горных пород разрушают раздавливанием, истиранием и ударом, так как эти способы дробления конструктивно легче осуществляются. Вместе с тем раздавливанию и истиранию горные породы оказывают наибольшее сопротивление. Разрушение же их, например, сдвигающими или растягивающими усилиями должно происходить со значительно меньшими затратами энергии.

Независимо от вида нагружения существуют только два пути, по которым могут разрушаться материалы - путем разрыва или сдвига (рис. 1). Известно, что наиболее легко, т. е. при наиболее низких напряжениях, твердые тела разрушаются под действием растягивающих и сдвигающих нагрузок. Так для разрыва атомных связей требуется растягивающее напряжение σ_{max} порядка $E/5$, а сдвиг атомов друг относительно друга происходит легче, и обычно для совершенного кристалла прочность на сдвиг τ_{max} составляет $\sim E/30$, где E – модуль Юнга [3].

Процессы разрушения минерального сырья являются необратимыми и создают в перерабатываемом материале существенно неравновесные состояния. Так при взрывной отбойке руды и в процессах дробления и измельчения развивающиеся в материале напряжения значительно превышают предел его прочности, что приводит к возникновению и развитию диссипативных структур. Особенностью взрывного разрушения рудного массива является максимальное развитие именно растягивающих и сдвигающих нагрузок. Эти нагрузки действуют не только в масштабе взрываемого блока горной породы, но и на различных структурных уровнях от макротекстурных неоднородностей до атомного уровня. При дроблении и измельчении минерального сырья в первую очередь создаются сжимающие нагрузки, вызывающие значительные пластические деформации разрушаемого материала, а уже затем развиваются напряжения растяжения и сдвига.

Разрушение руды - это разрушение ее структуры, определяемой взаимосвязью слагающих руду минеральных зерен. Отсутствие исчерпывающей количественной характеристики структуры минерального агрегата предопределяет трудности при построении адекватных математических моделей разрушения и раскрытия руд. Сам процесс раз-

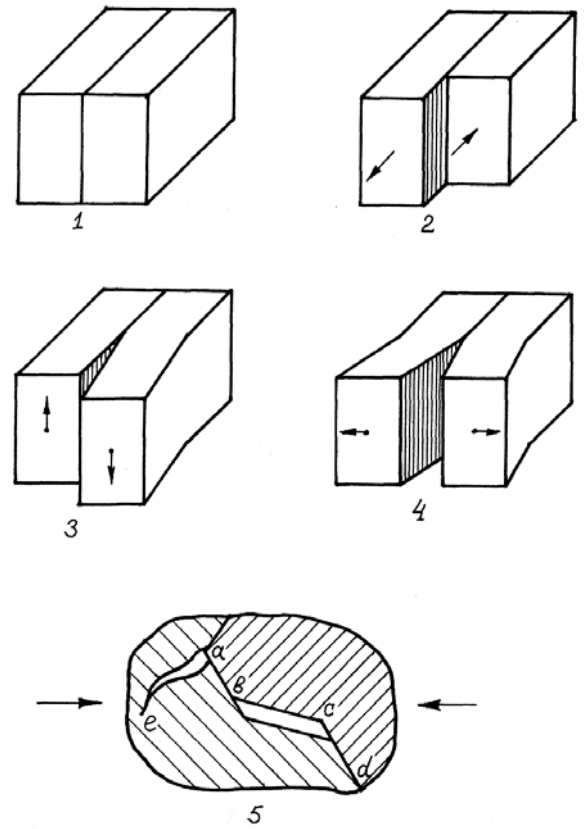


Рис. 1. Типы разрушения в поликристаллической минеральной среде: *1* – ненарушенная граница зерен; *2* – поперечный сдвиг (проскальзывание); *3* – продольный сдвиг (кручение); *4* – отрыв (скол); *ab, cd* – плоскости интеркристаллитного скольжения; *bc* – плоскость интеркристаллитного отрыва; *a e* – трещина транскристаллитного скола

рушения поликристаллического твердого тела развивается постепенно, охватывая следующие структурные уровни:

1. Атомный уровень с характерными размерами от масштаба элементарной кристаллической ячейки до минимального блока мозаики (кристаллита), то есть порядка 1-100 нм.

2. Кристаллический уровень в интервале линейных размеров 100-1000 *нм*, включающий в себя характерные размеры элементарных кристаллитов.

3. Субструктурный (субзеренный) уровень, связанный с группами дислокационных субструктур и обуславливающий появление ячеек, субзерен или блоков. Характерный масштаб этого уровня 1-100 мкм.

4. Структурный уровень, определяемый размерами зерен минералов и имеющий преимущественный масштаб 0,01-10 мм.

5. Макроскопический уровень с характерным размером 1-100 см. Этот уровень связан с крупными зернами, текстурными элементами и отдельностями горной породы.

Перечисленные уровни являются как бы последовательно вложенными один в другой и создают естественную иерархию структур. Энергия связи элементов структуры внутри уровней возрастает по мере уменьшения масштаба уровня.

Разрушение руды - это разрушение ее структуры, определяемой взаимосвязью слагающих руду минеральных зерен. Отсутствие исчерпывающей количественной характеристики структуры минерального агрегата предопределяет трудности при построении адекватных математических моделей разрушения горных пород и раскрытия минералов в процессах дезинтеграции руд.

Горные породы в большинстве случаев являются крайне неупорядоченными полиминеральными поликристаллическими средами. Основные элементы структуры горных пород представляют

собой плотно прилегающие друг к другу кристаллы минералов, форма, размеры, ориентация, физико-механические свойства и содержание которых имеют вероятностный характер распределения. Кристаллы в горных породах, образующиеся в стесненных условиях, чаще всего не имеют правильной геометрической формы и называются крис-таллитами, или зернами. При этом между кристаллитами имеется сильная взаимосвязь, определяющая прочность связи по границе их срастания и дающая вклад в прочностные характеристики горной породы в целом.

В горных породах всегда имеются дефекты кристаллического строения, основными из которых на макроуровне являются границы зерен, трещины и пустоты различного вида, и на микроуровне - дислокации, атомы внедрения и вакансии. Любые дефекты кристаллической решетки являются местами концентрации напряжений при механическом нагружении материала и могут инициировать начало его разрушения.

Границы срастания зерен минеральных фаз или, просто, межзеренные границы представляют собой дефекты планарного типа, т. е. некоторые поверхности, являющиеся носителями структурно-механических свойств кристаллитов и разделяющие в среде две области, отличающиеся друг от друга одним или несколькими признаками: поворотом, двойниковой ориентацией, кристаллографической симметрией, химическим составом, физическими свойствами. На границе свойства сплошной среды меняются скачкообразно. Толщина границы в зависимости от ее природы может составлять от одного атомного слоя (двойниковая граница) до десятка и более межатомных расстояний.

В горных породах границы зерен содержат в себе максимальное количество дефектов различного рода и, вследствие этого, представляют собой наиболее слабое звено в процессах разрушения. Кроме того, границы зерен представляют собой динамические образования и способны мигрировать, исчезать и зарождаться в процессах нагружения и разрушения твердых тел. В принципе границы представляют собой самостоятельный элемент структуры, во многом определяющий прочностные и другие свойства поликристаллической среды. Так как границы зерен дают основной вклад в прочностные характеристики поликристаллических материалов, целенаправленное ослабление или разрушение связей по межзеренным границам представляет значительный практический интерес.

С точки зрения раскрытия минералов при измельчении руды необходимо выделять два класса границ срастания минералов: гомофазную границу, разделяющую зерна одного минерала, и гетерофазную, разделяющую зерна разных минералов. Идеальное раскрытие минералов - это разрушение связей между зернами в руде преимущественно по гетерофазным границам. В естественных условиях разрушение по границам зерен происходит при выветривании горных пород, что приводит к практически полному раскрытию зерен минералов в россыпях.

Характерная особенность гомофазных границ между одноименными минералами - наличие общих атомов, через которые зерна как бы прирастают друг к другу, обеспечивая тем самым ту или иную степень прочности связи на границе. Тем не менее, эта связь все же остается значительно менее прочной, за исключением двойниковых границ, чем межатомные связи внутри кристаллической структуры минерала.

Прочность гетерофазных границ определяется в первую очередь электрическими свойствами контактирующих минералов. Прочность связи между зернами на границе срастания зависит также от наличия примесей (сегрегации) в зоне контакта зерен и от состава этих примесей.

Контакт зерен по гомо- или гетерофазной границе срастания минералов приводит к перераспределению электронов и переносу их через границу, возникновению областей пространственного заряда, контактной разности потенциалов и электрических полей, образованию новых валентных связей. Контактные явления на межфазной границе определяются электропроводностью минералов, их диэлектрической проницаемостью и сродством к электрону, работой выхода электрона, типом проводимости, концентрацией носителей заряда и шириной запрещенной зоны.

Таким образом, границы зерен являются местом возникновения и распределения электрических зарядов и связанных с ними электрических полей, которые, в свою очередь, могут активно взаимодействовать с внешними электромагнитными полями и полями механических напряжений. В связи с этим наложение внешних электромагнитных полей с определенными параметрами в сочетании с механическими напряжениями может приводить к возникновению и развитию разрушающих напряжений преимущественно по границам зерен минералов и, в конечном итоге, к повышению степени раскрытия минеральных фаз при дезинтеграции горной породы.

Дезинтеграция минерального сырья в технологических процессах горного производства происходит в условиях, далеких от равновесия. За счет повторяемости циклов нагрузки в зернах минералов и в материале в целом развиваются не только разрушающие напряжения, но и усталостные упругие и пластические деформации и генерируются различные структурные дефектыи в первую очередь вакансии и дислокации. Дислокация - дефект принципиально неравновесный. Дислокации вступают в реакции аннигиляции, слияния или распада, если энергия системы при этом понижается. Таким образом, приложенные к горной породе нагрузки вызывают диссипацию подводимой к породе энергии за счет генерирования и развития дислокационных структур.

Динамика дислокаций, генерируемых в процессе нагружения и разрушения материала, обусловлена не только развивающимся напряжением, но и механизмом взаимодействия дислокаций. В результате действия между ними сил притяжения и отталкивания одноименные дислокации группируются в устойчивые стенки, разделяя зерно на ненапряженные области, повернутые относительно друг друга на некоторый угол и образующие субзеренную структуру. При повторяющихся нагрузках плотность дислокаций в стенках и разориентация блоков увеличиваются за счет генерации и притока одноименных дислокаций и субзеренные границы преобразуются в границы зерен, по которым как наиболее ослабленным элементам структуры и происходит дальнейшее разрушение материала. Диссипация подводимой энергии за счет генерации вложенных друг в друга структур прекращается при размерах зерен менее 0,5 мкм, т. е. при достижении частицами кристаллического уровня структуры, где энергетически более выгодным становится сток дислокаций к поверхности зерна, чем образование ячеистой структуры.

Обработка железистых кварцитов при одновременных динамических электромагнитных и упругих волновых воздействиях проводилась в лабораторных и опытно-промышленных условиях путем наложения импульса электромагнитного поля с градиентом напряженности до 10^8 А/м^2, частотой колебания электромагнитного поля 20-40 кГц, длительностью его действия порядка 100 мкс на упругие волны напряжения амплитудой во фронте до 300 МПа. [4], [5].

Отдельно в производственных условиях исследовалось влияние генезиса железистых кварцитов их структурно-текстурных особенностей на показатели взрывной рудоподготовки и последующие показатели обогатительного передела [6].

Как показали дальнейшие исследования для повышения эффективности раскрытия минералов в кристаллических горных породах требуется более тщательная синхрнизация импульсных электромагнитных и упругих волновых воздействий

Так в одной из последних работ [7] приводятся параметры полей при которых происходит деструкция железистых кварцитов и выдвигаются ряд гипотез ,позволяющие объяснить полученные новые явления сопровождающие мощные динамические волновые воздействия (в работе приводится новое рабочее название «взрывомагнитные»).

Как показал структурный анализ новых полученных результатов импульсное взрывомагнитное воздействие на железистые кварциты вызывает значительные структурные нарушения, связанные с возникновением и развитием макро- и микротрещин (рис. 2). Крупные трещины, видимые невооруженным глазом, развиваются преимущественно по границам рудных прослоев с нерудными, то есть по межфазным границам зерен. На этих границах имеет место максимальное различие в электромагнитных и механических свойствах соприкасающихся минералов, в результате чего развиваются механические напряжения, значительно превосходящие пределы прочности горной породы. На рис. 2 показано развитие основной широкой и параллельной ей побочной макротрещины. Обе макротрещины разрывают рудный массив по границе рудного (А) и нерудного (Б) прослоев. Хорошо видны значительные нарушения сплошности рудного массива, связанные с деформациями сдвига и отрыва, выколами и выпадением зерен минералов, попавших в зону трещин.

Непосредственно в трещинах наблюдаются многочисленные островки агрегатов и отдельных зерен магнетита (белое) и кварца (серое), потерявших связь с рудным массивом и удерживаемых в трещинах только за счет сохранившейся связи с последним в нижней части зерен. Практически все макро- и микротрещины развиваются по границам зерен как рудных (магнетит), так и нерудных минералов (рис. 3, 4), в результате чего повышается раскрытие минеральных фаз и увеличивается измельчаемость руды.

При энергетических воздействиях на горную породу в зернах минералов происходит увеличение плотности дислокаций и последние начинают группироваться в дислокационные стенки. В результате слияния дислокаций в дислокационные стенки в зернах появляются блоки с различающейся ориентацией и формируется субзеренная структура. На рис. 4 стрелками показана такая субзеренная структура (светлые области в зернах кварца), сгенерированная взрывомагнитным воздействием.

Дальнейшая эволюция субзеренной структуры приводит к увеличению разо-

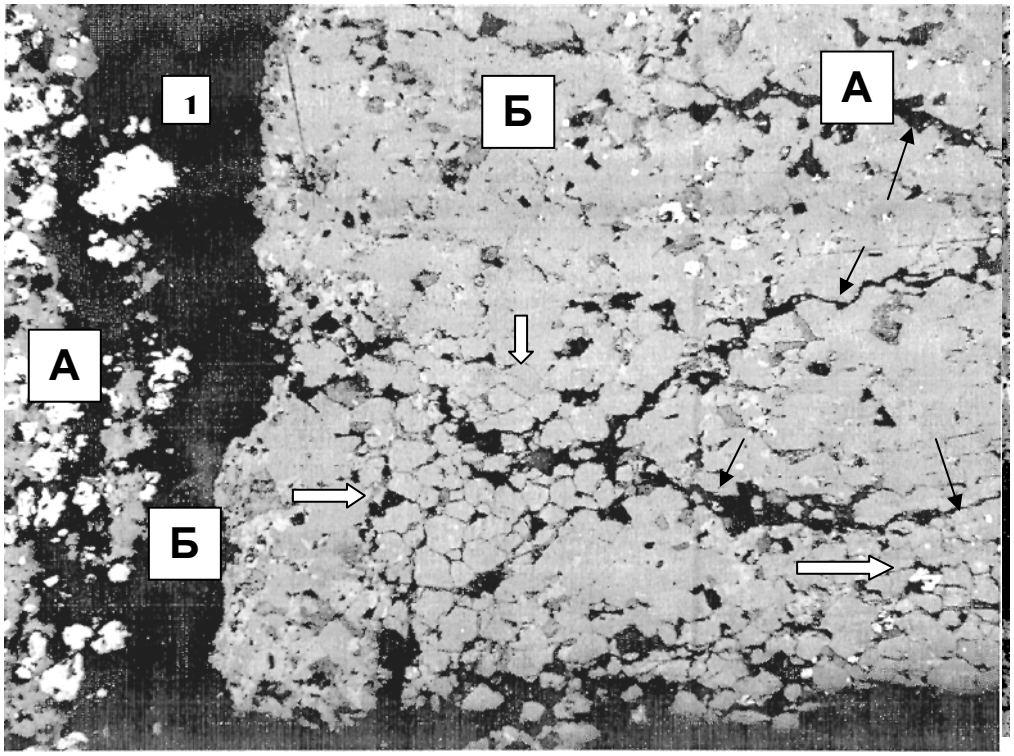


Рис. 2. Образец железистого кварцита Лебединского месторождения после импульсной электромагнитной обработки. Развитие макротрещин (черное) на границе рудного (А) и нерудного (Б) прослоев. Белые зерна – магнетит, серое различной плотности – кварц и другие породообразующие минералы

Рис. 3. Макротрещина (1) на границе рудного (А) и нерудного прослоев в железистом кварците. Черными стрелками показаны микротрещины в массиве кварца. Белыми стрелками показаны области интенсивной микротрещиноватости по границам зерен кварца

риентации субзерен и превращению их в зерна, разделенные большеугловыми границами. Таким образом, внутри зерен в результате обработки материала развивается новый подобный предыдущему, но более мелкий структурный уровень со своим линейным масштабом и с ослабленными связями на вновь образованных границах, по которым происходит дальнейшее разрушение породы.

Динамика дислокаций, генерируемых в процессе нагружения и разрушения материала, обусловлена не только развивающимся напряжением, но и механизмом взаимодействия дислокаций. В результате действия между ними сил притяжения и отталкивания

При повторяющихся нагрузках плотность дислокаций в стенках и разориентация блоков увеличиваются за счет притока одноименных дислокаций и субзеренные границы преобразуются в границы зерен, по которым как наиболее ослабленным элементам структуры и происходит дальнейшее разрушение материала. Диссипация подводимой энергии за счет генерации вложенных друг в друга структур прекращается при размерах зерен менее 0,5 *мкм*, т. е. при достижении частицами уровня структуры, где энергетически более выгодным становится сток дислокаций к поверхности зерна, чем образование ячеистой структуры.

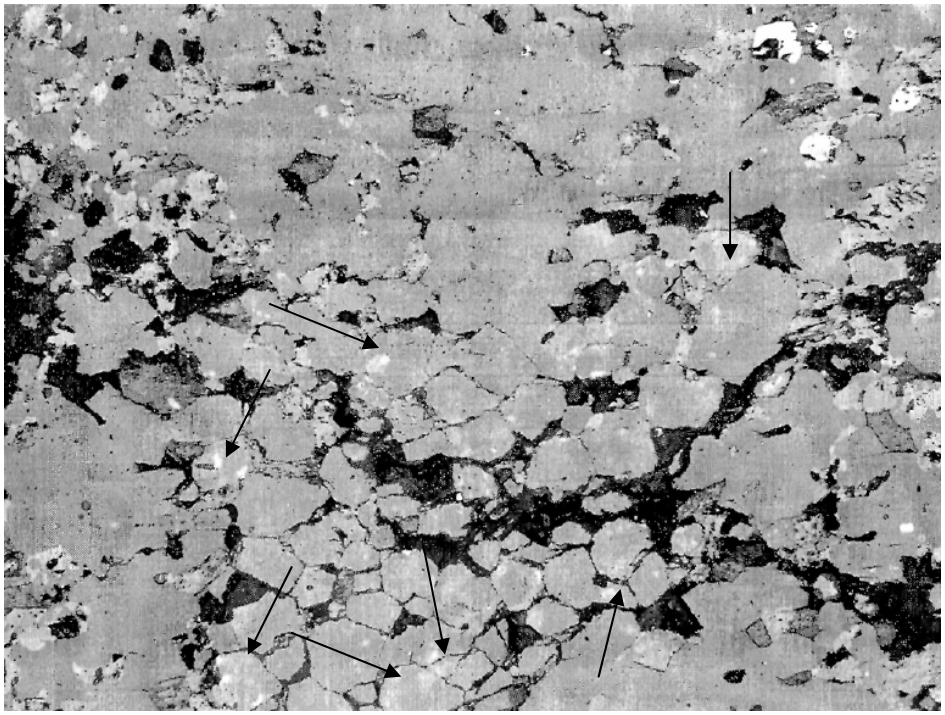


Рис. 4. Участок кварцевого массива с развитыми микротрещинами по границам зерен кварца. Стрелками показаны некоторые светлые зоны внутризеренных деформаций и остаточных напряжений, сгенерировавших субзерна в зернах кварца. Зерна магнетита – одноименные дислокации группируются в устойчивые стенки, разделяя зерно на ненапряженные области, повернутые относительно друг друга на некоторый угол и образующие субзеренную структуру

Дислокация - дефект принципиально неравновесный. Дислокации вступают в реакции аннигиляции, слияния или распада, если энергия системы при этом понижается. Таким образом, приложенные к горной породе нагрузки вызывают диссипацию подводимой к породе энергии за счет генерирования и развития дислокационных структур. белое, кварц – серое, черное – макро- и микротрещины и пустоты, образовавшиеся в результате выпадения отдельных зерен, потерявших связь с матриксом.

Полная энергия дислокации на единицу ее длины U_D является суммой энергии ядра U_C и энергии упругого поля U:

$$U_D = U + U_c = \\ = (Gb^2 / 4\pi k)\ln(R / r_c) + U_c, \qquad (1)$$

где G - модуль сдвига, b - вектор Бюргерса дислокации, r_C - радиус ядра дислокации (обычно $r_C \sim 3b \sim 1$ *нм*), R - размер области действия дислокации, равный размеру зерна, K - постоянная (для винтовой дислокации $K = 1$, для краевой дислокации $K = 1-\nu$, где ν - коэффициент Пуассона). Энергия ядра U_C слабо зависит от внешней нагрузки и практически равна постоянной величине.

Удельная энергия дислокаций W_D при их плотности в единице объема ρ равна

$$W_D = \rho U_D = \rho U + \rho U_c = W + W_c =$$
$$= (\rho G b^2 / 4\pi k) \ln(R / r_c) + \rho U_c, \qquad (2)$$

и возрастает пропорционально увеличению ρ. Здесь W и W_C - удельные плотности энергий упругого поля и ядер дислокаций, в которых аккумулируется энергия пластической деформации. Чем ниже плотность дислокаций, тем более крупные субзерна будут образовываться в монокристалле при выстраивании дислокаций в стенки - границы субзерен. С увеличением ρ в процессе нагружения и деформации монокристаллы разбиваются на все более мелкие субзерна, разделяемые сначала регулярными малоугловыми границами, которые с дальнейшим ростом плотности дислокаций превращаются в границы зерен. Таким образом, плотность ρ дислокаций, генерируемых в процессе диссипации подводимой энергии, определяет масштаб следующего более мелкого структурного уровня, зарождающегося внутри предыдущего уровня.

Из (2) удельная упругая энергия дислокаций W, накапливаемая в кристалле при его деформации, составит

$$W_D - W_c = W = (\rho G b^2 / 4\pi k) \ln(R / r_c), \qquad (3)$$

Эта энергия определяет дальнодействующую составляющую поля дислокации, логарифмически убывающую с расстоянием от ее оси и дающую основной вклад в общую энергию дислокации. При $R = r_C$ вся энергия дислокации сосредоточена в ее ядре и является энергией пластической деформации ядра W_P, то есть в этом случае $W_D = W_C = W_P$. Максимальное значение энергии дислокации в объеме зерна не может превышать энергию разрушения материала W_K и, таким образом, $W_P \le W_D \le W_K$. Тогда в предельных случаях из (1.3) получим

$$W_D - W_c = W_k - W_p = C \ln(R / r_c), \qquad (4)$$

где $C = (\rho\, G\, b^2 / 4\pi K)$, или

$$(W_k - W_p) C = \ln(R / r_c), \qquad (5)$$

Вероятность разрушения зерна $P(W)$ меняется от 0 до 1 при увеличении прикладываемой к нему энергии от W_P до W_K , то есть представляет собой равномерное распределение случайной величины. Зарождение дислокации является зарождением разрушения материала, которое по мере увеличения плотности прикладываемой к материалу энергии преобразуется из отдельных микроскопических нарушений сплошности в микротрещины, переходящие в трещины, вызывающие разрушение материала. Для каждого i-го кристалла существуют свои определенные значения W_{Ki} и W_{Pi}. С возрастанием i композиция равномерно распределенных слагаемых W_{Ki} и W_{Pi} асимптотически стремится к нормальному распределению. Следовательно, для большого массива зерен левая часть равенства (5) подчиняется нормальному закону распределения, а размер образуемых дислокационными стенками (субграницами) зерен и субзерен R будет, соответственно, иметь логарифмически нормальное распределение. Таким образом, логнормальное гранулометрическое распределение зерен минералов как в сложноструктурном массиве кристаллических горных пород, так и при его дезинтеграции является вполне закономерным и обусловлено процессами генерирования, развития, накопления и взаимодействия дислокаций.

Подобие структурных уровней, развивающихся последовательно в процессе разрушения минерального сырья, определяется действием одних и тех же механизмов зарождения, развития и стабилизации элементов структуры каждого уровня в результате генерации, диффузии и взаимодействия вакансий, дислокаций и дисклинаций. При этом структура как единая система переходит последовательно от одного устойчивого

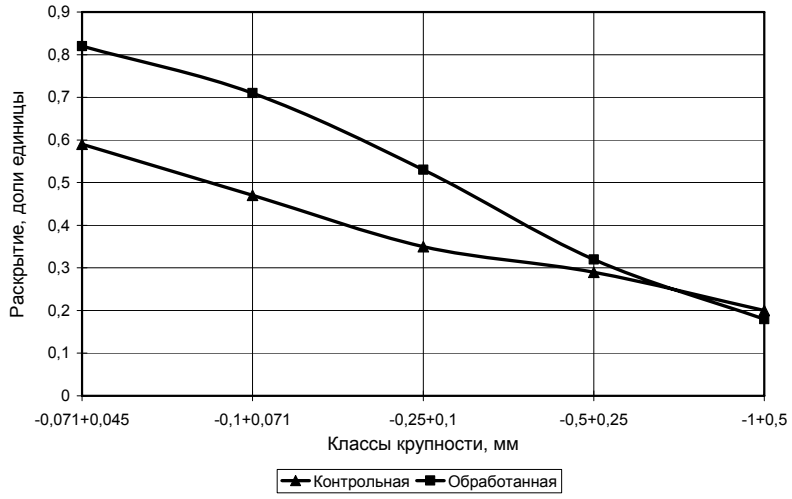
Усредненные результаты измельчаемости и обогатимости контрольных и обработанных взрывомагнитным воздействием проб железистых кварцитов

Показатель	Контрольная проба	Обработанная проба
Содержание железа общего в исходной руде, %	39,6	38,7
Содержание железа общего в в концентрате, %	67,92	68,64
Содержание железа магнитного в хвостах, %	1,03	0,96
Содержание в концентрате класса -0,044 мм, %	96,9	97,4
Коэффициент измельчаемости относительно кварца, %	1,6	1,7
Прирост производительности мельниц, %		5

аттрактора с масштабом структуры L_1 к следующему аттрактору с масштабом L_2 ($L_1 > L_2$). Здесь значения масштабов соответствуют моде логарифмически нормального распределения элементов соответствующего структурного уровня.

Переход с одного структурного уровня на следующий более мелкий в смысле размера образующихся частиц и, соответственно, более глубокий в смысле энергетических затрат на разрушение, может происходить через промежуточное состояние, во время которого постепенное накопление и группирование генерируемых дефектов приводит к зарождению и развитию элементов следующего структурного уровня, подобных элементам структуры предыдущего уровня. Такое подобие характерно для фрактальных структур, а развивающиеся в процессе разрушения горной породы последовательно вложенные друг в друга субструктуры образуют мультифрактал.

Таким образом, при разрушении горных пород определенная часть энергии, затрачиваемая на разрушение, расходуется на создание иерархии диссипативных структур. И хотя эта энергия не затрачивается непосредственно на разрушение, некоторая ее часть компенсируется в дальнейшем разрушением по вновь образовавшимся границам зерен, имеющим значительно более низкую прочность, чем породный матрикс. Следует отметить, что высокая энергоемкость процессов разрушения горных пород является, в частности, следствием возникновения и развития диссипативных структур.



Анализ результатов исследований влияния взрывомагнитных импульсов на показатели последующего обогатительного передела показали следующее.

Контрольная и обработанные взрывомагнитными и импульсами пробы железистых кварцитов измельчали в шаровой мельнице в одинаковых условиях, рассевали на классы крупности и для каждого класса определяли степень раскрытия магнетита. Затем пробы сепарировали на магнитном сепараторе. На рис. 5 представлены результаты анализа раскрытия магнетита в классах крупности для контрольной и обработанной руды. В таблице представлены усредненные результаты обогащения контрольной и обработанной проб.

Как следует из приведенных данных, взрывомагнитная обработка повышает раскрытие магнитита в классе -0,25+0,1 мм на 18 %, а в классе -0,1+0,045 мм на 23 %. В результате повышения степени раскрытия и коэффициента измельчаемости обработанной руды наблюдается прирост производительности мельницы на 5 % и повышается содержание железа общего в концентрате на 0,78 %. Все это обеспечивает положительный тех-нико-экономический эффект от применения взрывомагнитной обработки, который по расчетам составит 67,5 руб. на 1 т перерабатываемой руды.

Кроме этого предварительные укрупнённые расчёты показывают, что энергоёмкость процессов взрывной отбойки дробления и измельчения при всей технологии рудоподготовки может составлять в связи с несовершенством существующей традиционной технологии до 100 МДж/м^3, а с применением новой технологии взрывомагнитной обработки руды в массиве может быть снижена до 10 МДж/м^3, что создаёт предпосылки для создания эффективной малооперационной ресурсосберегающей новой техники ,и технологии рудоподготовки [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дремин А.А.* Стратегия энергосбережения при добыче и переработке железных руд. // Горный журнал. — 2006. — № 12.

2. *Гончаров С.А., Ананьев П.П., Бруев В.П.* Разупрочнение железистых кварцитов методом импульсной электромагнитной обработки.

Рис. 5. Раскрытие магнетита в классах крупности

Горный журнал, 2004, № 1.

3. *Петч Н.* Металлографические аспекты разрушения. //Разрушение. Т. 1. Под ред. Г. Либовиц. М.: Мир. 1973. С. 376-420.

4. *Совершенствование* техники и технологии взрывной рудоподготовки (комбинированного разрушения железистых кварцитов) и одновременное разупрочнение межзерновых связей высокочастотным электромагнитным полем. Отчёт НИР № гос. рег.01840044550, заключительный гф.1-140 МГИ. 1985.

5. *Совершенствование* и разработка элементов технологии взрывной рудоподготовки железистых кварцитов взаимодействием волн

Отчёт НИР № гос. рег.01860101620, гф.4-120 МГИ. 1988.

6. *Разработка* параметров взрывной рудоподготовки железистых кварцитов для восточного сложноскладчатого участка кА-рьера Стойлеского ГОКа. Отчёт НИР 33/01-08, ГФ-4-318, МГИ 1989.

7. *Анисимов В.Н* Мощные взрывомагнитные воздействия, их влияние на процесс деструкции и возникновение новых эффектов в кристаллических горных породах. Препринт ГИАБ №7 2007.

8. *Анисимов В.Н.* Концепция малооперационной ресурсосберегающей технологии взрывной рудоподготовки железистых кварцитов с применением дополнительных импульсных

Коротко об авторах

Анисимов В.Н. – кандидат технических наук, докторант,
Смольяков А.Р. – кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный горный университет.

Статья представлена кафедрой «Разрушение пород взрывом», Московского государственного горного университета.
Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.А. Белин.*