

УДК 622:53

*А.Р. Смольяков*

**ГЕНЕРАЦИЯ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР  
В ПРОЦЕССАХ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ  
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Семинар № 4

**П**риродное рудное или нерудное минеральное сырье представляет собой многофазные поликристаллические системы, содержащие пространственно выделенные структуры различных иерархий. Например, пространственная иерархия структур включает в себя масштабы от рудного массива до элементарной кристаллической ячейки. В естественных условиях месторождение является открытой неомогенной геологической системой, находящейся в условиях равновесия. Однако большинство технологических процессов, связанных с переработкой минерального сырья, являются необратимыми и создают в перерабатываемом материале существенно неравновесные состояния. Так при взрывных работах, дроблении и измельчении развивающиеся в материале напряжения значительно превышают предел его прочности, что приводит к возникновению и развитию дислокационных структур. Диапазон процессов дезинтеграции минерального сырья практический интерес представляют 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 и более. Этот уровень связан с 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 уровней возрастает по мере уменьшения масштаба уровня. Субструктурный уровень в исходных горных породах, находящихся в квазиравновесном состоянии, может отсутствовать, но он неизбежно генерируется в технологических процессах, связанных с разрушением породы. Для количественного описания основных структурных уровней необходимо знать статистические функции распределения структурных параметров элементов, составляющих эти уровни. Для уровня элементарных кристаллитов и всех более крупных

уровней обобщающей структурной характеристикой элементов является их гранулометрический состав.

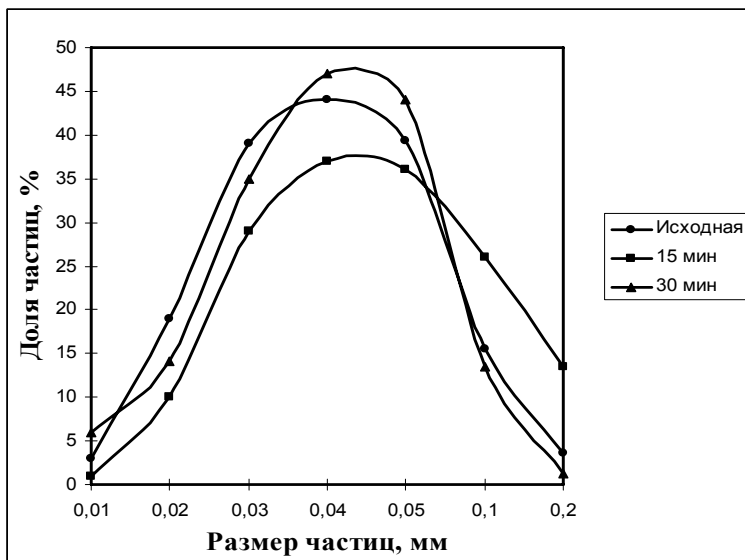
Для описания гранулометрического состава продуктов дезинтеграции твердых материалов применяют уравнения Розина-Раммлера, Годена-Андреева и др., распределения Вейбулла, Гаусса, логарифмически нормальное и др. Для каждого конкретного материала кривую распределения частиц по их размерам получают путем подстановки в применяемые аналитические зависимости значений нескольких параметров, устанавливаемых экспериментальным путем. Вполне вероятно, что гранулометрические характеристики продуктов измельчения зависят от структурных характеристик зерен в исходном не измельченном материале, данные о которых обычно отсутствуют ввиду сложности их получения.

Действительно, естественный гранулометрический состав руды в значительной степени предопределяет гранулометрический состав продуктов ее измельчения. Так, например, в железистых кварцитах гранулометрический состав зерен кварца, основного по содержанию минерала в руде, определяет гранулометрический состав продуктов измельчения. На рис. 1 и 2 показана тесная корреляция между размерами зерен кварца в руде и размерами частиц в продуктах измельчения последней. Такая взаимосвязь распределения размеров исходных зерен кварца и частиц в продуктах измельчения указывает также, что в процессах дезинтеграции разрушение руды происходит преимущественно по границам зерен минералов.

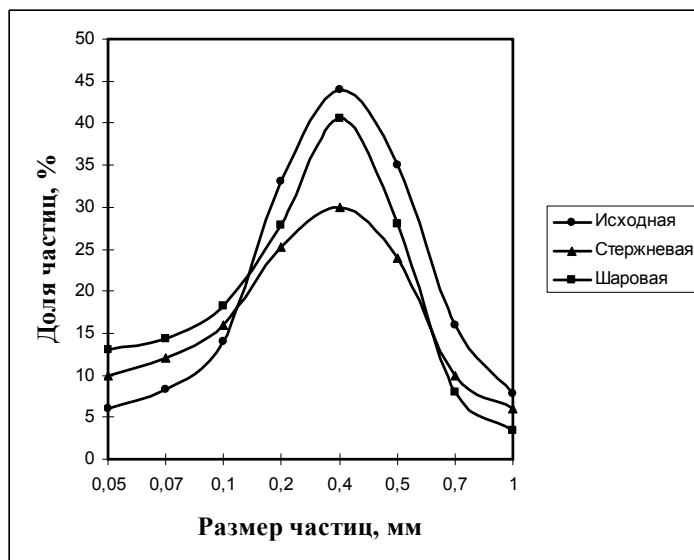
Исследования с применением анализатора изображения гранулометрических характеристик зерен порообразу-

ющих и рудных минералов в рудном и нерудном минеральном сырье различного состава и генезиса и распределения по размерам пор и зерен породной матрицы в породах коллекторах нефти и газа показали, что геометрические параметры (длина, ширина, периметр, площадь) зерен любых минералов и пор во всех исследованных материалах преимущественно подчиняются логарифмически нормальному закону распределения. Вероятно, логарифмически нормальное распределение геометрических параметров элементов структуры является наиболее распространенным законом для кристаллических минеральных сред. Тогда становится понятным, почему гранулометрические характеристики измельченных кристаллических материалов часто соответствуют именно этому распределению. Но механизм возникновения такого распределения оставался невыясненным и мы его здесь рассмотрим.

Измельчение минерального сырья в технологических процессах происходит в условиях, далеких от равновесия. За счет многократной 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 дефекты: вакансии, дислокации, дисклинации. По мере увеличения в зернах плотности дислокаций последние начинают группироваться в дислокационные стенки, в зернах появляются блоки с различающейся ориентацией и формируется субзеренная структура. Дальнейшая эволюция субзеренной структуры приводит к увеличению разориентации субзерен и превращению их в зерна, разделенные



*Рис. 1. Распределение зерен кварца в недробленной руде и частиц в продукте шаровой мельницы при времени измельчения 15 и 30 минут (руда Лебединского месторождения)*



*Рис. 2. Распределение зерен кварца в исходной недробленной руде и частиц в продуктах измельчения руды в промышленных стержневой и шаровой мельницах Оленегорского ГОКа*

большеугловыми границами. Таким образом, внутри зерен по мере измельчения материала развивается новый по-добный предыдущему структурный уровень со своим, уже более мелким линейным масштабом (рис. 3).

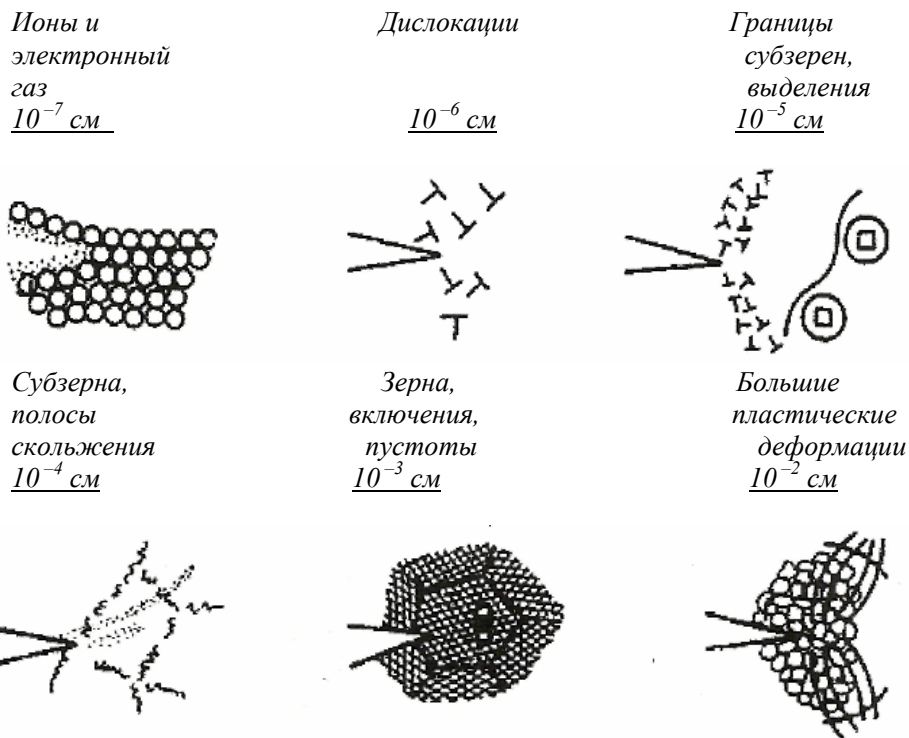
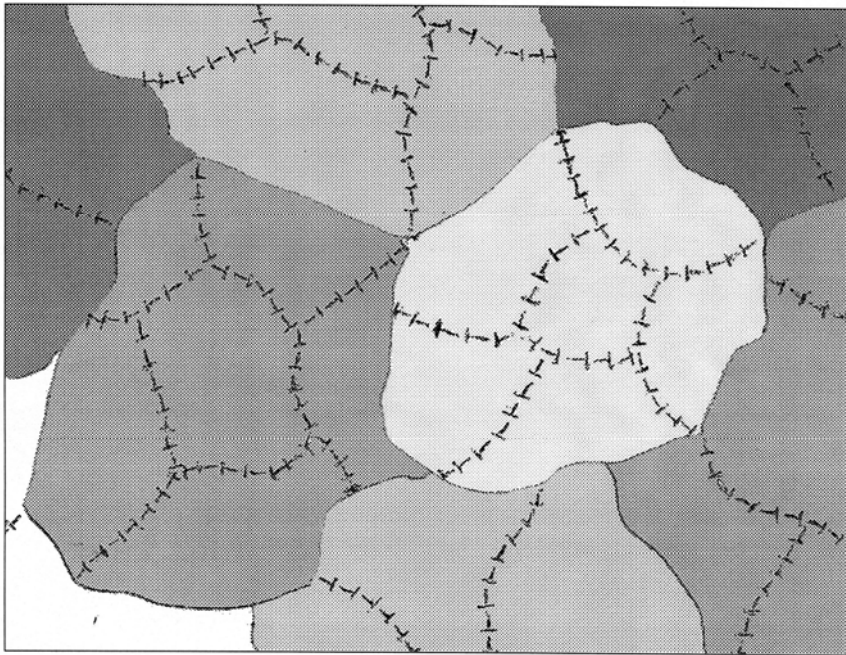


Рис. 3. Последовательность структурных переходов при разрушении горной породы

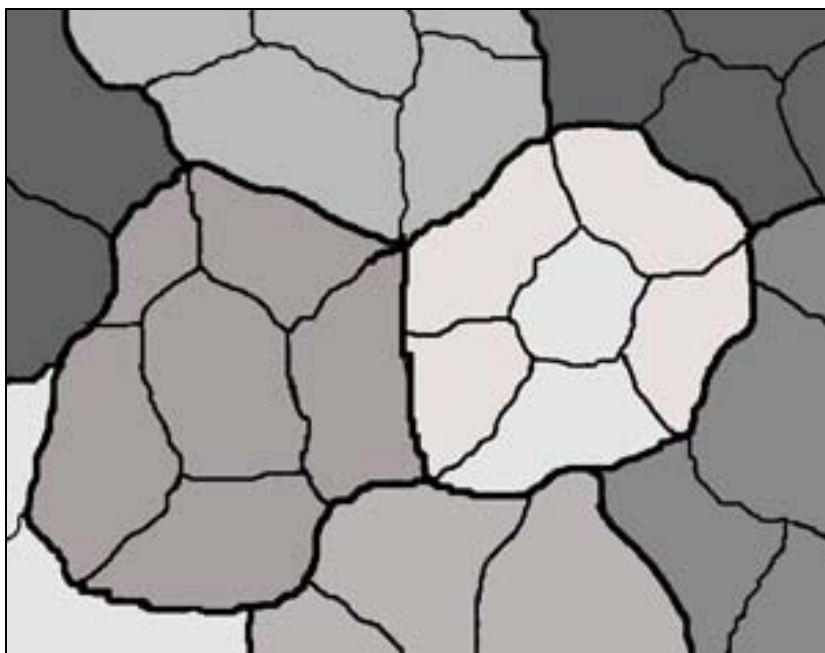
Динамика дислокаций, генерируемых в процессе нагружения и разрушения материала, обусловлена не только прикладываемым напряжением, но и механизмом взаимодействия дислокаций. В результате действия между ними сил притяжения и отталкивания одноименные дислокации группируются в устойчивые стенки, разделяя зерно на ненапряженные области, повернутые относительно друг друга на некоторый угол и образующие субзеренную структуру (рис. 3, 4). При повторяющихся нагрузках плотность дислокаций в стенках субзерен и разориентация блоков увеличиваются и за счет притока одноименных дислокаций субзеренные границы преобразуются в границы зерен (рис. 5),

по которым как наиболее ослабленным элементам структуры и происходит дальнейшее разрушение материала. Диссипация подводимой энергии за счет генерации вложенных друг в друга структур прекращается, вероятно, 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.

Дислокация - дефект принципиально неравновесный. Дислокации вступают в реакции аннигиляции, слияния или распада, если энергия



*Рис. 4. Развитие субзеренной структуры в зернах минералов в процессе дезинтеграции руды*



*Рис. 5. Превращение субзерен в зерна за счет преобразования границ субзерен в межзеренные границы*

системы при этом понижается. Полная энергия дислокации на единицу ее длины  $U_D$  является суммой энергии ядра  $U_C$  и энергии упругого поля  $U$ :

$$U_D = U + U_C = (G b^2 / 4\pi K) \ln(R / r_c) + U_C, \quad (1)$$

где  $G$  - модуль сдвига,  $b$  - вектор Бюргера дислокации,  $r_c$  - радиус ядра дислокации (обычно  $r_c \sim 3b \sim 1$  нм),  $R$  - размер области действия дислокации, равный размеру кристалла,  $K$  - постоянная ( для винтовой дислокации  $K = 1$ , для краевой дислокации  $K = 1-\nu$ , где  $\nu$  - 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  $\rho$  равна

$$W_D = \rho U_D = \rho U + \rho U_C = W + W_C = (\rho G b^2 / 4\pi K) \ln(R / r_c) + \rho U_C, \quad (2)$$

и возрастает пропорционально увеличению  $\rho$ . 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  $\rho$  в процессе нагружения и деформации монокристаллы разбиваются на все более мелкие субзерна, разделяемые сначала регулярными малоугловыми границами, которые с дальнейшим ростом плотности дислокаций и дисклинаций превращаются в границы зерен. Таким образом, плотность  $\rho$  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

$$W_D - W_C = W = (\rho G b^2 / 4\pi K) \ln(R / r_c), \quad (3)$$

Эта энергия определяет дальнюю действующую 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  $W_D$  в объеме зерна не может превышать энергию разрушения материала  $W_K$  и, таким образом,  $W_P \leq W_D \leq W_K$ . Тогда в предельных случаях из (3) получим

$$W_D - W_C = W_K - W_P = C \ln(R / r_c), \quad (4)$$

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

$$(W_K - W_P) / C = \ln(R / r_c), \quad (5)$$

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 макронесплошности, 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 массиве горной породы, 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 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. **ИИАН**

### **Коротко об авторах**

*Смоляков А.Р.* – Московский государственный горный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 4 симпозиума «Неделя горняка-2007».  
Рецензент д-р техн. наук, проф. *С.А. Гончаров*.

