

Влияние структуры на особенности разрушения горных пород: лабораторный эксперимент и моделирование методом дискретных элементов

Дамаскинская Е.Е. (1), Гиляров В.Л. (1), Гесин И.Д. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

(2) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия

e-mail: Kat.Dama@mail.ioffe.ru

Предложена компьютерная модель разрушения гетерогенных материалов (в том числе, горных пород), позволяющая исследовать эволюцию дефектной структуры (трещин) в процессе деформирования. Модель основана на методе дискретных элементов (DEM - Discrete element method), который наиболее адекватен для моделирования разрушения гетерогенных материалов. В отличие от методов, основанных на механике сплошных сред, модели дискретных элементов естественным образом имитируют образование и развитие трещин.

В работе была использована модель связанных частиц (bonded particle model – BPM [1]), различные модификации которой широко применяются для изучения поведения материалов при механическом разрушении. Материал представляется как совокупность сферических частиц (моделирующих зерна поликристалла), соединенных связями (моделирующими межзеренные границы) в местах контактов частиц. В модели BPM зарождение трещин определяется разрывом связей между частицами, а распространение - слиянием множества разорванных связей [2].

Были проведены компьютерные эксперименты при различных параметрах материала (дисперсия зерен по механическим свойствам и размеру, различные свойства на границах зерен), с целью выявления их влияния на картину локальных напряжений, процесс образования дефектов и формирование очага разрушения. Расчеты производились в свободно распространяемом пакете программ MUSEN [3].

Моделировались образцы цилиндрической формы диаметром 10mm и высотой 20mm. Размеры подобраны таким образом, чтобы была возможность сравнить результаты компьютерных экспериментов, с результатами лабораторных экспериментов, полученных ранее на образцах горных пород таких же размеров. Цилиндры заполнялись сферическими частицами одного или разных размеров и упаковывались до достижения пористости 0.35–0.37. В качестве материалов, из которых состояли сферические зерна и связи между ними (межзеренные границы), использовались материалы с механическими параметрами, соответствующими различным минералам и горным породам: гранит, кварц, ортоклаз, олигоклаз, стекло. Образец помещался в виртуальный пресс, в котором нижняя плита была неподвижна, а верхняя перемещалась в направлении нижней с постоянной скоростью до тех пор, пока образец не разрушался.

Расчет максимальных локальных напряжений показал, что гомогенность материала приводит к большей неоднородности локальных напряжений в пространстве, и наоборот, гетерогенность способствует большей их однородности. Подобное поведение локальных внутренних напряжений, рассчитанных на основании кинетической концепции С.Н. Журкова [4], наблюдалось в лабораторных экспериментах по деформированию образцов гранита Westerly и песчаника Berea. [5].

Предложенная модель поликристаллических материалов реалистично описывает некоторые особенности их разрушения в тех случаях, когда основные процессы протекают по границам зерен. К таким особенностям относятся хрупкий характер разрушения гомогенных материалов и наличие нелинейной упругости (пластичности) для более гетерогенных, выявленные при помощи

диаграммы напряжение–деформация, и поведение во времени «акустической активности» – числа разорванных связей за единицу времени. Для гетерогенных материалов модель демонстрирует двухстадийный характер разрушения, когда на первой стадии происходит накопление дефектов однородно по образцу, а на второй стадии - формирование и рост очага разрушения.

Мы предполагаем, что дальнейшие компьютерные эксперименты и их анализ позволят сопоставить распределение эволюционирующих в процессе разрушения дефектов по размерам и энергетическое распределение сигналов акустической эмиссии. Это позволит выяснить, при каких условиях происходит переход от Марковского процесса к состоянию самоорганизованной критичности.

Список литературы.

1. D.O. Potyondy, P.A. Cundall. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, 1329–1364, (2004)
2. A. Lisjak, G. Grasselli. *J. of Rock Mech. and Geotechnical Engineering* 6, 301, (2014)
3. M. Dosta, V. Skorych. *SoftwareX* 12, 100618, (2020)
4. S.N. Zhurkov. *J. Fracture Mechanics* 1, 311 (1965)
5. В.Л. Гиляров, Е.Е. Дамаскинская. *ФТТ*, 63, 6, 783-787 (2021)