

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ В ОБЛАСТИ, ОБЛАДАЮЩЕЙ СВОЙСТВАМИ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ

Е. Е. Дамаскинская*, В. Л. Гиляров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: Kat.Dama@mail.ioffe.ru

Предложена компьютерная модель, позволяющая исследовать разрушение гетерогенного материала (в том числе, горных пород) со сложной иерархической структурой. Модель основана на методе дискретных элементов (*discrete element method*, DEM) [1], который наиболее адекватен для моделирования разрушения гетерогенных материалов. В работе была использована модель связанных частиц (*bonded particle model*, BPM) [2], 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].

Для моделирования сложной иерархической структуры, в том числе, подобной зоне субдукции, была модифицирована открытая платформа MUSEN [3]. В результате, появилась возможность учитывать сложную геометрию интерфейса плит, неоднородность минерального состава и вариации механических свойств, а также включения с повышенной прочностью (*asperity*).

Модель воспроизводит процесс одноосного сжатия цилиндрических образцов, сформированных из сферических частиц различных фракций (кварц, ортоклаз, олигоклаз), соединенных упругими связями (частицы из одинаковых материалов соединялись связью из этого же материала, а частицы из разных материалов соединялись связями, имеющими значительно более низкий модуль и пределы прочности). Внутри образца находится область, имитирующая зону субдукции. Показано, что наличие «зоны субдукции» в образце приводит к значительному уменьшению прочности и долговечности образца.

В симуляциях выявлена последовательность разрушения структурных элементов: сначала происходит дестабилизация низкопрочной прослойки, имитирующей границу (зону трения) между плитами, за которой следует постепенное каскадное разрушение высокопрочных включений (*asperity*). На этом этапе разрушение имеет локализованный характер, связанный с разрушением включений. Фрактальная размерность данных локальных очагов разрушения ~ 2 . Затем наблюдается дисперсное разрушение во всем объеме образца. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к образованию очага разрушения (вне области *asperity*), рост которого захватывает все больший объем, что сопровождается увеличением фрактальной размерности.

Был проведен анализ максимальных локальных растягивающих напряжений и деформаций. Установлено, что энтропия Шеннона, рассчитанная по распределениям этих параметров, при разрушении *asperity* сохраняет примерно постоянное значение. В то время как изменение энтропии Шеннона при разрушении остальных фракций материала подобно изменению напряжения на образце. Этот факт подтверждает особую роль включений в процессе разрушения.

Литература

1. Lisjak A., Grasselli G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses // J. of Rock Mech. and Geotechnical Engineering. 2014. Vol. 6 (4). P. 301–314.
2. Potyondy D.O., Cundall P.A. A bonded-particle model for rock // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2004. Vol. 41 (8). P. 1329–1364.
3. Dosta M., Skorych V. MUSEN: An open-source framework for GPU-accelerated DEM simulations // Software X12. 2020. P. 100618.

MODELING THE FRACTURE PROCESS IN A REGION WITH PROPERTIES OF A SUBDUCTION ZONE

E. E. Damaskinskaya*, V. L. Gilyarov

Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

*E-mail: *Kat.Dama@mail.ioffe.ru*

A computer model is proposed for studying the fracture of heterogeneous materials (including rocks) with a complex hierarchical structure. The model is based on the DEM (discrete element method), which is most adequate for simulating the fracture of heterogeneous materials. A BPM (bonded particle model) was used in this study; various modifications of this model are widely used to study the behavior of materials under mechanical fracture. The material is represented as a set of spherical particles (simulating polycrystalline grains) connected by bonds (simulating grain boundaries) at the points of particle contact. In the BPM model, crack initiation is determined by the rupture of bonds between particles, and crack propagation is determined by the merging of multiple broken bonds.

To model complex hierarchical structures, including those similar to a subduction zone, the open-source MUSEN platform was modified. This made it possible to account for complex plate interface geometry, heterogeneity of mineral composition, variations in mechanical properties, and inclusions with increased strength (*asperity*).

The model simulates the uniaxial compression of cylindrical samples formed from spherical particles of various fractions (quartz, orthoclase, oligoclase) connected by elastic bonds (particles made of the same materials were connected by a bond made of the same material, while particles of different materials were connected by bonds with significantly lower modulus and ultimate strength). Within the sample is a region simulating a subduction zone. It was shown that the presence of a «subduction zone» in the sample leads to a significant reduction in strength and durability.

The simulations revealed a sequence of failure of structural elements: first, destabilization of the low-strength interlayer simulating the boundary (friction zone) between the plates occurs, followed by gradual cascading failure of high-strength inclusions (*asperity*). At this stage, failure is localized, associated with the failure of the inclusions. The fractal dimension of these local failure foci is ~ 2 . Dispersed failure is then observed throughout the entire volume of the sample. A further increase in stress leads to the formation of a failure foci (outside the *asperity* region), whose growth encompasses an increasingly larger volume, accompanied by an increase in fractal dimension.

An analysis of the maximum local tensile stresses and strains was conducted. It was found that the Shannon entropy, calculated from the distributions of these parameters, remains approximately constant during *asperity* failure. While the change in Shannon entropy during fracture of the remaining fractions of the material is similar to the change in stress on the specimen, this fact confirms the special role of inclusions in the fracture process.