

05.1;12

Зона поврежденности высокомодульных материалов при взрывном нагружении гранита

© А.М. Лексовский, В.А. Боровиков, Н.С. Бозоров,
А.А. Абдуманонов, А.Б. Синани, С.А. Пилецки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: Albert.Leksowskij@pop.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 25 марта 2002 г.

На примере горной породы типа гранит показано, что при взрывном нагружении помимо общеизвестной зоны трещинообразования в породе имеет место более протяженная зона микроповреждений высокомодульных кристаллов. Предложен способ определения размеров этой зоны и показано, что при изменении плотности взрывчатого вещества и режима взрывного нагружения радиус этой зоны микроповреждений высокомодульных кристаллов может быть изменен в несколько раз.

Проблема повышения естественной сохранности драгоценных кристаллов при взрывном способе дезинтеграции горных пород по настоящее время остается чрезвычайно актуальной [1]. В [2] с помощью люминесцентной микроскопии на примере гранита была показана возможность выявления *post factum* индуцированных взрывом микроповреждений (микронесплошностей) в высокомодульных минералах. Оказалось, что если на расстоянии $20 \div 30 R_{03}$ (R_{03} — „радиус“ заряда, или радиус шпура) разрушаются зерна полевого шпата и кварца, то на большом удалении ($\geq 40R_{03}$) разрушаются преимущественно зерна кварца. Зерна слюды в наших образцах оставались неразрушенными. Т.е., как показал эксперимент, разрушаются в первую очередь высокомодульные кристаллы, на что ранее никем не обращалось внимания. С позиции физики прочности композиционных материалов это обстоятельство является естественным, поскольку в условиях совместной деформации именно в высокомодульных кристаллах могут быть достигнуты критические напряжения при одной и той же общей деформации гетерогенной породы. Представлялось интересным на модельных образцах и в модельной

ситуации проверить справедливость такого предположения в случае динамического нагружения. На основе шайб из органического стекла ПММА (полиметилметакрилата) диаметром 50 mm и толщиной 10 mm было изготовлено 3 группы модельных „композитных“ образцов, которые имели в центре сквозной канал диаметром 1.5 mm, заполненный отвержденной эпоксидной смолой. Одна группа таких образцов содержала в этом канале высокопрочное и, главное, высокомодульное борное волокно ($E = 400$ GPa) диаметром 100 μm . В другой группе образцов вместо борного волокна было вклеено высокопрочное, но с меньшим модулем ($E = 70 \div 90$ GPa) стеклянное волокно также диаметром 100 μm . С целью создания кратковременного растягивающего усилия по оси шайбы все образцы подвергались нагружению ударом с помощью легкогазовой пушки дюралевым стаканчиком по дюралевому буферу [3]. При этом скорость соударения была на уровне 100 \div 220 m/s, длительность импульса составляла 2 \div 3 μs , геометрическая длина импульса 6 mm. Эксперимент показал, что динамическая откольная прочность образцов из чистого оргстекла и образцов с инородным каналом из эпоксидной смолы составляет ≈ 160 –180 МПа. В эксперименте с образцами третьего типа уже при скорости соударения 109–120 m/s разрушается, как оказалось, только высокомодульное борное волокно. В этом случае динамическая нагрузка на оргстекле была на уровне 80–90 МПа и основное тело образца (ПММА) при этом оставалось неразрушенным, т.е. традиционного откольного макроразрушения не происходило. Анализ поверхности разрушения извлеченного борного волокна с помощью растрового электронного микроскопа показал, что разрушение волокна инициировалось изнутри, с поверхности раздела бор–вольфрам, т.е. происходило так, как если бы волокно растягивали за два конца, поэтому разрыв волокна не был следствием развития трещины с границы раздела оргстекло–эпоксидная смола. В случае образца со стеклянным волокном разрушение последнего происходит при заметно большей динамической нагрузке — на уровне 120–130 МПа, т.е. при большей деформации системы в целом, но меньшей, чем в случае исходного образца из оргстекла.

Таким образом, в прямом эксперименте показано, что в гетерогенном материале не только в условиях статического нагружения, что давно и хорошо известно исследователям, но и при динамическом нагружении реализуется принцип совместного деформирования. Поэтому высокомодульные кристаллы (включения) даже на большом удалении

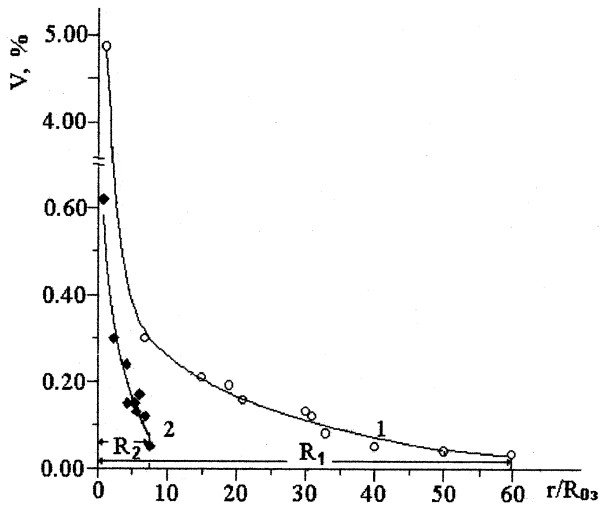


Рис. 1. Объем микронесплошностей в высокомодульных минералах гранита на разном расстоянии от центра взрыва: 1 — для плотного ($\sim 1.6 \text{ g/cm}^3$) взрывчатого вещества, 2 — для малоплотного (0.5 g/cm^3) взрывчатого вещества.

от центра взрыва могут получить повреждения (в них могут рождаться микротрещины) и при незначительных напряжениях в кристалловмещающей породе в целом.

Теперь рассмотрим вопрос о размерах этой опасной зоны микроповреждений высокомодульных кристаллов. После проведения камуфлетного взрыва, как и ранее [2], из блока гранита на разном расстоянии от центра взрыва вырезались образцы. Путем взвешивания фрагментов на электронных весах ER-180A (с точностью до 10^{-4} g) в исходном состоянии (после вакуумной сушки) и после пропитки в „легком“ смачивающем растворителе оказалось возможным определить в некотором приближении „истинный“ объем, занятый микротрещинами, и тем самым определить наведенную взрывом интегральную поврежденность $V, \%$ (рис. 1). Можно видеть (см. кривую 1), что даже на расстоянии $(40 \div 60)R_{03}$ высокомодульные компоненты гранита при взрыве сосредоточенного заряда тэна плотностью $\sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ имеют повреждения. На первый взгляд они могут казаться незначительными,

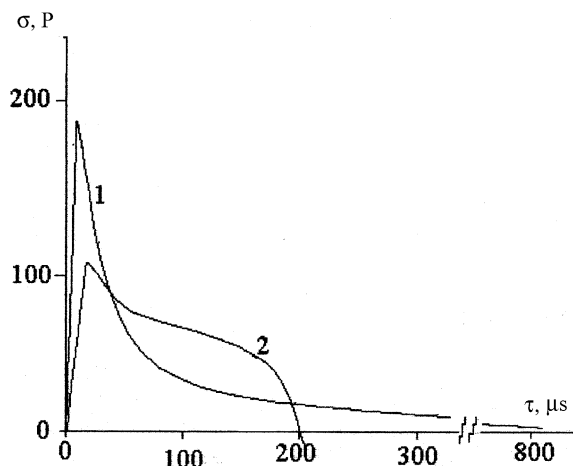


Рис. 2. Схематическое изображение профиля волны напряжений: 1 — для плотного ($\sim 1.6 \text{ g/cm}^3$) взрывчатого вещества, 2 — для малоплотного (0.5 g/cm^3) взрывчатого вещества.

по крайней мере по сравнению с поврежденностью в ближней зоне. Если раскрытие микротрещин принять равным $0.1 \div 1 \text{ мкм}$, то в таком образце в зависимости от расстояния до центра взрыва окажется от нескольких до 100 и более пустых „пластин“, равных по площади поперечнику выбранного фрагмента. Уровень поврежденности на расстоянии $r \geq 60R_{03}$, который был приобретен на предшествующей стадии добычи гранита в промышленном карьере, является исходным для наших образцов. Необходимо отметить, что для гетерогенного материала с постоянным составом компонентов график объемной поврежденности может рассматриваться как распределение истинных локальных деформаций при взрыве блока породы, а разрушенные высокомодульные кристаллы являются детекторами, индикаторами локальных деформаций.

Данные этих измерений позволяют оценить радиус зоны поврежденности высокомодульных кристаллов кварца в граните при взрыве сосредоточенного заряда тэна плотностью $\sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ на уровне $r \leq 60R_{03}$. Т.е. эту зону можно классифицировать как зону предразрушения, которая оказывается в несколько раз больше, чем наведенная

взрывом зона трещинообразования. Это может оказаться важным при взрывной отбойке блочного камня.

При переходе на заряд малой плотности ($\sim 0.5 \text{ g/cm}^3$) формируется особый профиль волны с меньшей амплитудой и с более равномерным распределением энергии [1] во времени (кривая 2 рис. 2). Как можно видеть (кривые 1, 2 рис. 1) из этих данных, радиус зоны микроповреждений в этом случае уменьшился в несколько раз.

Таким образом, этим методом удастся определить очень важную для практики характеристику — радиус зоны микроповреждений, т. е. радиус зоны, где с большей вероятностью будут наблюдаться повреждения (микротрещины) в высокомодульных кристаллах ценных минералов, которые и представляют, как правило, цель многих взрывных работ. Сравнение разных технологий — взрыва с помощью традиционного, плотного ($\sim 1.6 \text{ g/cm}^3$) и взрыва с помощью малоплотного (0.5 g/cm^3) зарядов показывает, что радиус зоны микроповреждений в последнем случае в 5–6 раз меньше.

Рассмотренные выше результаты дают основание считать, что примененный способ анализа поврежденности может выполнять роль эффективного инструмента при отработке технологии щадящего взрывания.

Список литературы

- [1] Боровиков В.А., Заостровцев В.Н., Шмырко А.Н. и др. // Труды VI международной научной конференции "Экология и развитие Северо-Запада России". МАНЭБ, 2001. С. 73–74.
- [2] Лексовский А.М., Боровиков В.А., Бозоров Н.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 3 (2). С. 6–8.
- [3] Златин Н.А., Мочалов С.М., Пугачев Г.С. и др. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 3. С. 681–682.