

## **ПРЕДРАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД КАК СТАДИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Рассматривается проблема предразрушения горных пород при квазистатическом и динамическом нагружении. Показано, что при динамическом воздействии возможно формирование зон предразрушения большой протяженности. Представлены данные ультразвуковых измерений после неразрушающего взрывного нагружения. Приведены экспериментальные данные по изменению скоростей распространения упругих волн после динамического нагружения.

Problems of rock pre-failure under quasi-static and dynamical loading are considered. It is demonstrated that rather large zones of rock pre-failure are formed under dynamical impact. Ultrasonic investigation findings of rock specimens exposed to non-destruction loading are presented. Characteristics of changes in elastic properties of rock specimens after loading are described.

В рамках современных представлений при описании процесса разрушения горных пород как при статическом, так и при динамическом нагружении принимается, что непосредственно конечная его стадия – потеря сплошности, переход среды в качественно новое физическое состояние (в частном случае ее фрагментация, обусловленная развитием макротрещин) – является лишь заключительным актом, а сам процесс разрушения характеризуется последовательным зарождением и развитием дефектов структуры на различных масштабных уровнях. При наиболее общих физических подходах можно ограничиться рассмотрением двух основных стадий: зарождением и развитием микродефектов и формированием макроразрушения на второй стадии [4, 9, 13, 23]. Начальная стадия эволюции внутренней микроструктуры горных пород, когда происходит деформация и переориентация отдельных зерен, нарушение связей, развитие микродефектов, изменение свойств и состояния некоторого объема среды, в последнее время характеризуется как предразрушение [10, 14, 20].

Природа этого процесса связана, прежде всего, с тем, что горная порода – сложная, иерархически организованная система,

микроподсистема которой неизбежно вовлекается в макроскопический отклик материала на внешнее воздействие. Одной из особенностей строения горных пород является трещиноватость в виде дискретно распределенных по размерам дефектов. Для каждого масштабного уровня горной породы существует свой характерный размер дефектов. Например, в монокристалле кварца имеются дефекты двух типов, определяющие его свойства: микротрещины размером порядка 1000 и 100 нм [18]. Необходимо отметить, что имеется очень мало непосредственных данных о параметрах микротрещин в горных породах и они порой противоречивы. По данным исследований [19, 21] длина микротрещин как одной из разновидностей дефектов горных пород обычно составляет менее 100 мкм, коэффициент облика плоской микротрещины обычно меньше  $10^{-2}$ . По данным работ [15, 17], характерные размеры микротрещин, которым соответствуют типичные значения прочности горных пород 50-100 МПа, составляют 1-10 мкм. По условиям формирования выделяют микротрещины отрыва, сдвига; по местам зарождения – микротрещины по границам зерен, внутрикристаллические

и т.д. Оценка условий развития микротрещин обычно производится в рамках теории разрушения Гриффитса – Ирвина.

Кроме того, особенность сложных геологических процессов, происходящих в массиве горных пород, обуславливает присутствующую всем горным породам неоднородность (изменчивость), связанную с неравномерностью распределения вещества и различными свойствами составляющих элементов. Горные породы неоднородны, состоят из отдельных минеральных зерен, имеют структурные особенности и различную плотность микродефектов, что определяет формирование специфического поля напряжений с высокими локальными параметрами при внешнем воздействии. В поликристаллических горных породах негидростатические сжимающие напряжения могут приводить к возникновению локальных напряжений растяжения, обеспечивающих возможность развития микродефектов, т.е. предразрушения.

Описанию закономерностей развития микротрещин в образцах горных пород при квазистатическом нагружении посвящены многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, которые показали, что структура области предразрушения породы может быть определена как кластер – связанные каналы сложной геометрии. Образование кластеров микронарушений на стадии предразрушения не ведет к дезинтеграции породы, но может в значительной степени изменить ее проницаемость. При последующем нагружении породы зона предразрушения развивается в область дезинтеграции породы с образованием трещин.

При испытаниях образцов горных пород на одноосное сжатие фактор предразрушения проявляется в нарушении закона линейной связи между деформациями и напряжениями. Как показывают анализ и обобщение экспериментальных данных в работе [22], уровень нагружения  $\sigma_{мд}/\sigma_c$  (где  $\sigma_c$  – предел прочности на сжатие), при котором наблюдается развитие микронарушений, зависит от типа горной породы, ее структурных особенностях и составляет 0,3-0,6. Сравнительно малые значения  $\sigma_{мд}$  заставляют предположить, что при таких нагрузках активизируются более

крупные дефекты, развитие которых завершается макроразрывом при сравнительно небольшом значении предела прочности образца на сжатие. При квазистатическом росте нагрузки микроразрушение горных пород происходит в объеме образца обычно также в квазистатическом режиме, а последующее развитие магистральной трещины – в динамическом режиме со скоростью, близкой к скорости звука в среде, с образованием макроразрыва на некоторой поверхности на более высоком масштабном уровне [13]. Это обстоятельство позволяет отметить, что управлять процессом разрушения и прогнозировать его итоги необходимо и возможно лишь на стадии предразрушения.

Развитие микронарушений при квазистатическом нагружении подтверждается данными ультразвукового контроля состояния образца песчаника при одноосном сжатии. Ультразвуковые измерения проводились перпендикулярно сжатию. Снижение скорости продольных волн свидетельствует о начале изменения состояния образца при напряжениях 10-15 МПа. Интересен факт снижения скорости продольных волн в процессе разгрузки, что характеризует процесс развития микронарушений под действием внутренних напряжений (рис.1).

При динамическом нагружении, как и при квазистатическом, процесс разрушения не протекает мгновенно, как предполагалось в ранних моделях [2], а характеризуется накоплением повреждений, распределенных во времени [6, 12]. Динамическое разрушение, как правило, является многоочаговым процессом, который относится к классу де локализованных разрушений. При динамическом

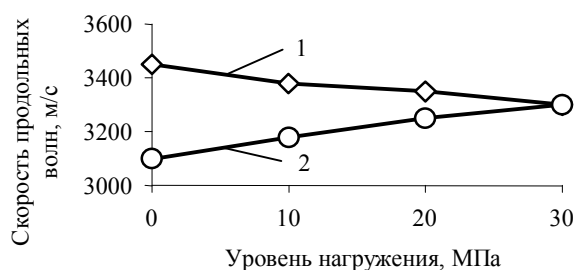


Рис.1. Изменение скорости продольных волн в образце песчаника в результате одноосного сжатия (1) и последующей разгрузки (2)

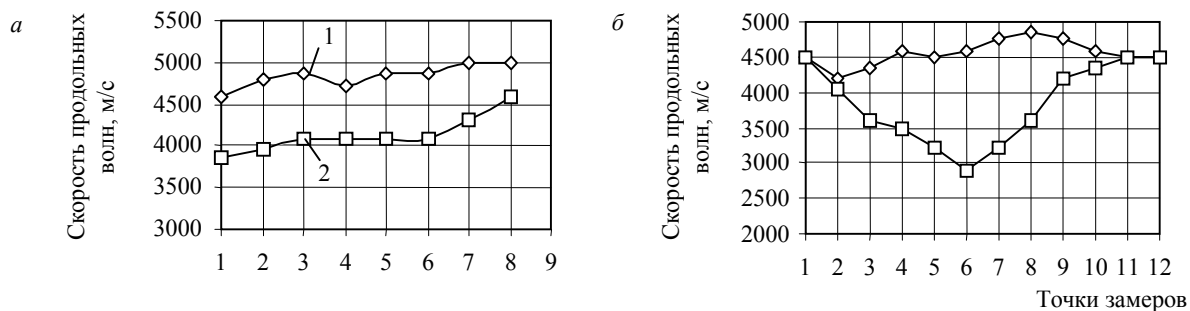


Рис.2. Распределение скорости продольных волн в песчанике (а) и мраморе (б)

1 – до взрыва; 2 – после взрыва

ческом нагружении на различных дефектах структуры возникают локальные поля напряжений и деформаций, которые используют подводимую энергию, запасаемую матрицей, вызывают эволюцию дефектов и формируют кластеры разного ранга. При этом в объеме возникает большое число микроочагов разрушения, дальнейший рост и объединение которых приводит к макро-разрушению. Чем быстрее происходит нагружение и, следовательно, больше скорость подвода энергии к дефектам, тем меньше по размерам дефекты переходят в критическое состояние. Простейшим способом описания такого процесса является формальное введение параметра, характеризующего степень поврежденности материала в каждом его индивидуальном объеме. Этот параметр введен в работе [7] как показатель предразрушения и изменяется от нуля до единицы. При этом ноль характеризует сплошной материал, а единица соответствует полному разрушению.

Следует отметить, что в рамках классических представлений о результатах взрывного воздействия на массив горных пород принимается, что вокруг полости формируется зона дробления, за которой следует зона радиальных трещин и зона упругих деформаций. Применительно к взрывному нагружению можно выделить целый ряд исследований, так или иначе связанных с проблемой «предразрушения». В то же время ряд авторов отмечали возможность формирования при взрыве некой переходной зоны повышенной микротрещиноватости между разрушенной и ненарушенной средой [8, 11, 16]. Выделяют снижение прочности руд для

повышения эффективности их дальнейшей переработки, ослабление массива под действием многократных динамических нагрузок, разупрочнение труднообрушаемых кровель и т.д. Идея разупрочнения взрывом с целью облегчения последующих операций дробления выдвигалась еще акад. Н.Н.Мельниковым и другими исследователями, напрямую связана с предразрушением горных пород и заключалась в том, что при взрыве заряда ВВ кроме системы макротрещин, разделяющих массив, образуется дополнительная система микротрещин. Изучение аншлифов железистых кварцитов под микроскопом показало присутствие в них после взрыва нитевидных трещин длиной до 10 мм. Взрывное нагружение позволило снизить исходную крепость породы на 3-4 категории, а энергия работы механического дробления и измельчения после взрывного нагружения уменьшилась на 20-30 % [3].

Проведенные нами исследования зон предразрушения породы при динамическом нагружении (при камуфлетном взрывании зарядов ВВ) позволили выявить следующие закономерности. Отмечается довольно значительное снижение скорости продольных волн после взрыва, что свидетельствует об ослаблении связи между отдельными элементами породы. При изучении скорости продольных волн на образцах песчаника и мрамора микрозаряды тэна располагались в центре образцов, а расстояние между точками измерений составляло 3 см. Характер микронарушений, как следует из графиков рис.2, зависит от петрографических особенностей породы. Так, в песчанике имеет место относительно плавное изменение коли-

чества повреждений с расстоянием от заряда, что предполагает дискретный характер их распределения. При взрывном нагружении мрамора на поверхности образца при сохранении его макросплошности образовывались нитевидные, извилистые, протяженные микротрещины. Радиус зоны предразрушения, оцененный по изменению скорости упругих волн, может превышать радиус взрывной полости в 30-100 раз, т.е. эта область является наиболее масштабной по размеру изменений в массиве пород при взрыве. Это указывает на то, что предразрушение породы вызвано действием волны напряжений. Действительно амплитуда волны напряжений затухает намного медленнее, чем интенсивность квазистатического послеволнового воздействия продуктов детонации.

Малая длительность взрывного импульса предопределяет хрупкое разрушение (микротрещинообразование) материала с минимальными потерями на пластическую деформацию. При волновом воздействии разрушению, в первую очередь, подвергаются высокомодульные кристаллы, являющиеся локальными объектами концентрации напряжений [5]. Разная степень поврежденности минеральных зерен гранита не связана напрямую с прочностью минералов. Так, кварц является наиболее прочным минералом, его прочность на растяжение и сжатие в 2-4 раза выше, чем у других минералов. В то же время наблюдается значительная микротрещиноватость минеральных зерен кварца при взрывном нагружении. Петрографические исследования, выполненные для образцов гранита, показали, что на расстоянии 15-20 радиусов заряда в 70-80 % зерен кварца отмечается микротрещиноватость взрывного происхождения. На одно зерно приходится от 1-3 до 13 микротрещин шириной 0,02-0,04 мм.

Следует подчеркнуть, что предразрушение горных пород в максимальной степени проявляется сразу после взрыва. Так, по результатам ультразвукового контроля образцов горных пород можно утверждать, что с течением времени после взрыва происходит восстановление скоростей упругих волн в области предразрушения (рис.3). Это сви-

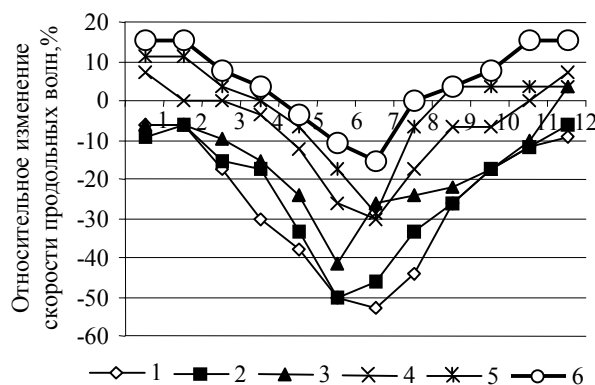


Рис.3. Изменение скорости продольных волн в образце песчаника после взрыва

1 — после взрыва; 2 — через день; 3 — через 0,5 мес;  
4 — через 2 мес; 5 — через 7 мес; 6 — через 11 мес

детельствует о развитии процесса «залечивания» наведенных микронарушений в породе, вызванных прохождением взрывной волны [1].

Таким образом, предразрушение горных пород как специфическая стадия эволюции внутренней структуры имеет место как при квазистатическом, так и при динамическом нагружении. Формирование области предразрушения обусловлено большим разбросом значений разрушающих напряжений для отдельных контактов и зерен горных пород (в более широком аспекте — неоднородностью горных пород), в силу чего развитие микронарушений, разрушение отдельных зерен или их перемещение носят локальный характер и не приводят к дезинтеграции породы, но наблюдается изменение свойств и состояния среды. Эти изменения с течением времени после нагружения носят обратимый характер. При динамическом (взрывном) нагружении предразрушение вызвано действием волн напряжений. В силу высокой начальной интенсивности взрывного нагружения и относительно медленного затухания амплитуды в волне напряжений формируется область предразрушения значительной протяженности. Процесс предразрушения существенно зависит от амплитуды и времени действия волн напряжений, а также от степени анизотропности материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 04-05-64150).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Викторов С.Д.* Изучение процессов свободной разгрузки образцов горных пород после взрывного нагружения / С.Д.Викторов, А.Н.Кочанов // Физико-техн. проблемы разведки полезн. ископаемых. 2004. № 2. С.52-57.
2. *Григорян С.С.* Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения горных пород // Прикладная механика и математика. 1967. Т.31. Вып.4. С.643-669.
3. *Демидюк Г.П.* Влияние взрывного нагружения на эффективность последующих этапов обогащения / Г.П.Демидюк, С.Д.Викторов, М.М.Фугзан // Взрывное дело. 1986. № 89/46. С.116-120.
4. *Журков С.Н.* Дилатонный механизм прочности твердых тел // Физика прочности и пластичности. М.: Наука, 1986. С.5-11.
5. Зона поврежденности высокомодульных материалов при взрывном нагружении / А.М.Лексовский, В.А.Боровиков, Н.С.Бозоров и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т.28. Вып.16. С.90-94.
6. *Ильюшин А.А.* Об одной теории длительной прочности // Инж. журн. МТТ. 1967. № 3. С.21-35.
7. *Кочанов А.Н.* Некоторые современные аспекты проблемы взрывного разрушения горных пород // Физические проблемы разрушения горных пород: Сб. тр. Четвертой международной научной конференции. ИПКОН РАН. М., 2005. С.214-217.
8. *Кук М.А.* Наука о промышленных взрывчатых веществах. М.: Недра, 1980. 456 с.
9. *Куksenko В.С.* Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел // Физика прочности и пластичности. М.: Наука, 1986. С.36-41.
10. *Лившиц Л.Л.* Энергетика хрупкого разрушения и акустическая эмиссия / Л.Л.Лившиц, Б.Г.Гавриков, А.А.Гвоздев // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 12. С.62-68.
11. *Мосинец В.Н.* Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. М.: Недра, 1976. 230 с.
12. *Никифоровский В.С.* Динамическое разрушение твердых тел / В.С.Никифоровский, Е.И.Шемякин. Новосибирск: Наука, 1979. 265 с.
13. *Одинцев В.Н.* Отрывное разрушение массива скальных горных пород / ИПКОН РАН. М., 1996. 166 с.
14. *Панин В.Е.* Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. 1998. № 1. С.5-22.
15. *Ревнивцев В.И.* Селективное разрушение минералов / В.И.Ревнивцев, Г.В.Гапонов. М.: Недра, 1988. 310 с.
16. *Садовский М.А.* О размере зон необратимого деформирования при взрыве в блочной среде / М.А.Садовский, В.В.Адушкин, А.А.Спивак // Механическое действие взрыва / ИГД РАН. М., 1994. С.323-329.
17. *Цай Б.Н.* Физические аспекты механизма разрушения горных пород // Физико-техн. проблемы разведки полезн. ископаемых. 2004. № 1. С.72-79.
18. *Цой Б.* О трех научных открытиях, связанных с явлением дискретности / Под ред. Э.М.Карташова, В.В.Шевелева. М.: Мир-Химия, 2004. 208 с.
19. *Costin L.S.* A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock // Journal of geophysical research. 1983. 88. 311. P.9485-9492.
20. *Jung Young-Hoon.* Finno Richard Development of nonlinear cross-anisotropic model for the pre-failure deformation of geomaterials / Jung Young-Hoon, Chung Choong-Ki // Comput. and Geotech. 2004. 31. № 2. С.89-102.
21. *Kraqnz R.L.* Microcracks in Rocks: A Review // Tectonophysics. 1983. № 100. P.449-480.
22. *Kwasniewski M.* Dylataneya yako zwiastun zniszenia scaly // Przegląd gorniczy. 1986. 42. № 2. С.42-49.
23. Two-stage Model of Fracture of Rocks / V.Kuksenko, N.Tomilin, E.Damaskinskya, B.Lockner // Pure Appl. Geophys. 1996. 146(2). P.253-263.