

В.В. Адушкин, Г.Г. Кочарян, И.В. Бригадин, С.А. Краснов
К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ РАЗРУШЕНИЯ ПРОЧНЫХ
СКАЛЬНЫХ ПОРОД ПОДЗЕМНЫМ ВЗРЫВОМ

На основании экспериментальных данных по подземным взрывам, в том числе ядерным, представлены постулаты по физической модели разрушения прочных скальных пород. Выдвинута гипотеза о новом физическом явлении, носящем скрытый характер, заключающемся в увеличении прочности пород от величин, характерных для открытой поверхности, до величин давления фазового превращения в зависимости от места в структурно-тектоническом блоке.

Ключевые слова: модель разрушения, гипотеза, структурно-тектонический блок, прочность на разрушение, давление фазового перехода.

Проблемы разрушения пород на больших глубинах

По мере развития человеческой цивилизации возрастает потребность в различных видах сырья скрытых в недрах Земли. Для добычи полезных ископаемых и некоторых нерудных материалов под землей используются, в подавляющем большинстве, взрывной способ разрушения пород с последующей переработкой до стадии требуемого сырья.

Взрывной способ подземной добычи основан на классических представлениях о природе и закономерностях разрушения скальных пород. основополагающая модель разрушения пород при подземном взрыве изложена в работах В.Н. Родионова [1]. На основе этой модели разработаны методология и способы разрушения.

Для подземной добычи твердых полезных ископаемых в крепких породах проходят выработки, а отбойку осуществляют методом буровзрывных работ (БВР) [2].

Современная технология проходки представлена в монографии [3].

Совершенствование буровой техники позволяет осуществлять бурение на расстояние до 10 диаметров выработки (около 50 м). Но подрыв зарядов

в таких скважинах не приводит к разрушению пород на расстоянии более 2÷3 диаметров выработки забоя. Этот факт объясняется наличием зоны отжима в окрестности выработки.

Известен способ разрушения породы, когда взрывы проводятся последовательно в зонах разгрузки от предыдущих взрывов [4].

Тем не менее, на рудниках, особенно на больших глубинах, длина единичной заходки не превышает 5÷7 м (около 2 диаметров типовой выработки).

Факт аномального эффекта разрушения, пожалуй, впервые отмечен в статье В.М. Кузнецова [5].

Таким образом, существующая теория физической природы разрушения горных пород на больших глубинах не объясняет многочисленных экспериментальных фактов, а применяемые методы и способы не позволяют разрушать породу на достижимую в современных условиях глубину бурения скважин.

Обоснование механизма разрушения пород

Основополагающим понятием в физике твердого тела (скальной породы) является предел прочности на сжатие

$\sigma_{сж}$, предел прочности на отрыв $\sigma_{отр}$ и давление фазового превращения $P_{ф}$ [6].

Длительное время скальный массив представлялся как единое целое. Современные исследования [7] позволили систематизировать и выделить строительную систему иерархического строения блочности от микроразмеров (кристаллы) до макровеличин (континенты).

Современные методы и способы разрушения лишь в незначительной степени используют теоретические основы блочности строения массивов. Например, параметры трещиноватости, как элемент блочности, используются в расчетах Б.Н. Кутузова [8].

Без совершенствования основ физики твердого тела с блочной структурой проблема революционного повышения эффективности БВР в рудниках не может быть решена.

На начальном этапе развития БВР длина шпуров (до 2÷5 м) была соизмерима с зоной разгрузки (отжатия) в забое выработки. В такой ситуации шпур снаряжался ВВ на полную длину и за один цикл забой выработки подвигался пропорционально коэффициенту использования шпура (КИШ). С началом использования скважин длиной до 10 м КИШ существенно уменьшился, и одновременно снизилась эффективность БВР.

Причиной снижения эффективности БВР и роста удельного расхода ВВ может быть явление увеличения прочности пород при всестороннем сжатии, т.н. зажатая порода [6, 9–12, 14].

Общепризнанно и общеизвестно, что скальные породы обладают некоторой граничной прочностью. Разрушение образцов пород происходит при сжатии, сдвиге и растяжении. Пределы прочности при указанных видах разрушения изменяются в широких диапазонах. Эти показатели заложены в нормативные документы и используются в горном деле, строительстве и физике вообще.

Известно также, что сжатая среда имеет большую прочность, чем образец. Установлено, что с увеличением глубины скального массива и ростом литостатического давления увеличивается и прочность массива в целом. Подтверждением этому являются специальные эксперименты и практика подземной разработки рудных тел, когда наблюдается как увеличение, так и снижение удельного расхода ВВ [13].

В тоже время имеются факты, которые существующей теорией не объясняются. К ним относятся образование «стаканов» в забое шпуров и скважин и полная устойчивость породы к взрывному воздействию при длинных шпурах, т.е. когда эта длина заметно превосходит характерный размер подземной выработки. Поэтому при проходке выработок длинными шпурами по центру врубовой зоны бурится свободная скважина [8, 15, 16].

Еще более парадоксальным следует признать явление полной устойчивости полости подземного ядерного взрыва (ПЯВ). На полигонах США в Неваде, Франции в Сахаре и СССР в Семипалатинске и на Азгире вскрыты и обследованы более 10 полостей, образованных ПЯВ. Характерно, что расплав породы наблюдается как в линзе, расположенной внизу, так и на стенках [17]. В этой зоне грунт должен быть разрушен до очень мелкой фракции [18].

В ряде случаев проводилось сравнение характеристик вмещающих пород на образцах [7] и выявлено, что прочность пород и массива в целом в окрестности полости изменилось незначительно, хотя в точках измерений величины давлений (напряжений) достигали 10 ГПа.

При ядерном взрыве однозначно наблюдается испарение и плавление породы и ее вытеснение за пределы полости [1]. При взрыве химических

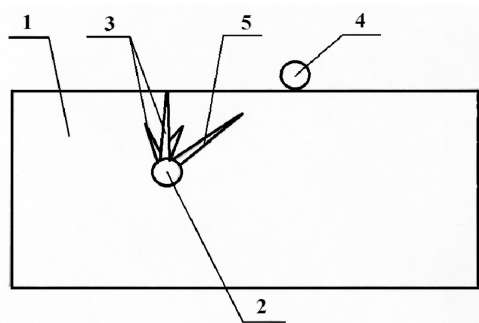


Рис. 1. Схема сравнительных экспериментов на различных материалах

ВВ на больших глубинах разрушение отсутствует полностью, что отмечается по следам термического воздействия на стенки сохранившихся шпуров и скважин в негабаритах.

На вопрос о том, каков механизм разрушения, наблюдаемый в основной массе экспериментов и промышленных взрывов, следует обратить внимание, что реальный массив имеет блочную структуру. В массиве блочной структуры за счет отраженных и преломленных волн возникает псевдотурбулентное движение. В некоторых экспериментах зафиксированы аномальные поперечные перемещения. Отличие таких перемещений и скоростей достигает десятков раз. Например, вместо ожидаемого смещения $0,1 \div 0,3$ м зарегистрировано смещение более 7 м.

В отличие от механизма разрушения, изложенного в фундаментальной работе [1], реальный процесс происходит несколько по-иному.

На начальном гидродинамическом этапе процесс расширения полости и излучения волны сжатия происходит достаточно симметрично.

В дальнейшем отраженная от любой неоднородности волна разрежения приводит к возникновению некоторой шероховатости на границе полость-грунт. При существенной шероховатости происходит срыв симметрии расширения полости с образова-

нием отколовшихся блоков различных размеров. Эти блоки двигаются достаточно самостоятельно, в том числе внутрь полости. При незначительной шероховатости полость сохраняет устойчивость и ее контур наблюдается в ряде экспериментов.

В механизме псевдотурбулентного движения основным фактором является наличие и образование свободных и полусвободных (на разломах) поверхностей, где образуются зоны влияния с конечной прочностью.

Псевдотурбулентное движение достаточно длительное по сравнению со временем волнового взаимодействия или распространения трещин (волны Рэлея). Именно таким движением можно объяснить экспериментальное время задержки подрыва между рядами скважин при массовых взрывах на карьерах. Например, для типового случая взрыва в скважинах диаметром 200 мм с шагом сетки до 8 м эффективное время задержки составляет около 30 мс при расчетном от 1 до 3 мс [19].

В обобщенном виде механизм разрушения горной породы представлен в статье А.В. Дугарцыренова [20].

Для уточнения природы и механизма разрушения твердых тел были проведены специальные сравнительные эксперименты (рис. 1) на различных материалах (кирпич, бетон, скальный грунт).

В блоке 1 в цилиндрической полости 2 подрывался заряд из нескольких ниток детонирующего шнура (ДШ). В результате взрыва ДШ материал блока в сторону свободной поверхности был разрушен на отдельные фрагменты несколькими радиальными трещинами 3. При подрыве ДШ в полости 2 и поверхностного заряда 4 из одной нитки ДШ наблюдалась одна магистральная трещина 5 строго в сторону заряда 4. При этом трещин в сторону свободной поверхности не наблюдалось.

Таким образом, разрушение горной породы определяется достаточной по интенсивности либо отраженной волной разрежения, либо встречной волной сжатия.

Постулаты механизма разрушения

Из совокупности экспериментальных фактов, очевидно, следует, что твердое тело, преимущественно кристаллической структуры, обладает свойством без заметного изменения плотности приобретать упорядоченную (упакованную) структуру, т.е. переходит в новое фазовое состояние, характеризующееся уже не прочностью на сжатие $\sigma_{сж}$, а давлением фазового перехода P_{ϕ} .

В этой связи можно констатировать установление нового физического явления изменения (увеличения) прочности скальной породы от начального значения на дневной поверхности $\sigma_{сж}$ до давления фазового превращения P_{ϕ} с удаленным от границы структурно-тектонического блока (ростом глубины).

Это явление носит скрытый характер, т.е. при извлечении образца породы с глубины массива на дневную поверхность его физико-механические характеристики приобретают типовые значения, полученные в лабораторных условиях.

На основе полученных экспериментальных результатов модель базируется на следующих постулатах.

1. Прочность пород на разрушение сжатием $\sigma_{сж}$ (сколом) и растяжением $\sigma_{отр}$ (отрывом) – это величина, изменяющаяся в пределах блока массива любого уровня.

2. Прочность породы на сжатие в пределах блока увеличивается от края к центру вплоть до величины давления фазового перехода P_{ϕ} .

3. Прочность на краю блока не обязательно равна прочности на границе со свободной поверхностью.

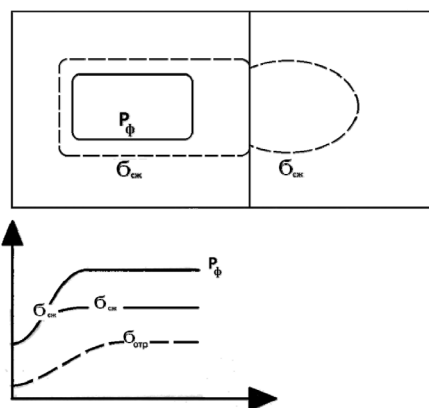


Рис. 2. Схема и характер изменения прочности массива

4. Процесс разрушения породы при взрывном воздействии носит триггерный и лавинообразный характер и происходит только при наличии возмущения достаточной интенсивности (волна сжатия или разрежения).

5. После разрушения массива на более мелкие блоки их движение носит псевдотурбулентный характер.

В этой связи главным является вопрос о времени релаксации физико-механических свойств и характере (закономерности) их изменения в зависимости от удаления от открытой поверхности (стенки скважины) или неоднородности (разлома).

При доведении горной выработки до такого места в блоке массива, где прочность достигает величин фазового давления P_{ϕ} , взрывное разрушение породы за пределами зоны отжима становится невозможным. Характер изменения прочности схематически показан на рис. 2.

Вблизи свободной поверхности 1 или разлома 2 структурно-тектонических блоков 3 и 4 прочность на сжатие $\sigma_{сж}$ или отрыв $\sigma_{отр}$ близки к традиционным (лабораторным) значениям. По мере удаления от границ блоков оба значения прочности возрастают, причем $\sigma_{сж}$ может достигнуть или не достигнуть величины P_{ϕ} .

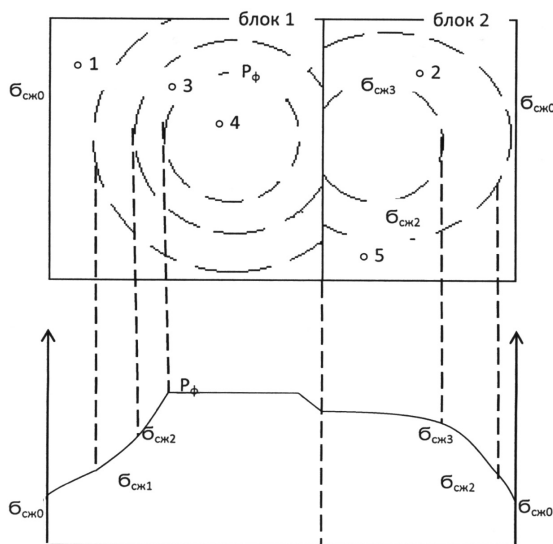


Рис. 3. Взаимосвязь прочности от мест отбора образцов проб в СТБ

В случае справедливости предлагаемых постулатов на рис. 3 представлено сравнение зависимости прочности от глубины, взятой из работы [13], и схемы, представленной на рис. 2.

Выводы

1. Современные представления о механизме разрушения прочных скальных пород основаны на экспериментальных фактах, полученных для условий свободной поверхности, а на больших глубинах в массивах блочной структуры требуется совершенствования.

2. Обоснованы постулаты механизма разрушения пород на больших глубинах в массивах блочной структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н. и др. Механический эффект подземного взрыва. – М.: Недра, 1971.
2. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ, ч. 2, Взрывные работы в горном деле и промышленности. – М.: Изд-во Горная книга, 2008. – С. 57–92.
3. Мангуш С.К., Крюков Г.М., Фисун А.П. Взрывные работы при подземной разработке полезных ископаемых. Учебник для вузов. – М.: Изд. АГН, 2000.
4. Авторское свидетельство СССР № 1765462.
5. Кузнецов В.М. и др. О механизме разрушения горных пород шпуровыми и скважинными зарядами ВВ // Взрывное дело. – 1982. – № 83/40. – С. 85–92.
6. Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. – М.: Наука, 2007.
7. Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Деформирование блочных массивов скальных пород. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003.
8. Кутузов Б.Н. Справочник взрывника. – М.: Недра, 1988.
9. Шемякин Е.И. Волны напряжения при подземном взрыве // Взрывное дело. – 2000. – № 93/50. – С. 4–12.
10. Джигрин А.В. Технология скоростной проходки выработок по крепким горным породам буровзрывным способом / Проблемы взрывного дела. – М.: МГТУ, 2002.
11. Исаков А.А. Влияние горного давления на направление разрушения горных пород взрывом // Взрывное дело. – 1986. – № 89/46.
12. Кочарян Г.Г. Модель необратимого деформирования горного массива // Взрывное дело. – 1990. – № 90/47.
13. Адушкин В.В., Спивак А.А. Разрушающее действие взрыва в предварительно-напряженной среде // Записки Горного института. – 2001. – Т. 148(1). – С. 21–32.
14. Шемякин Е.И. Сейсмический эффект мощного подземного взрыва // Взрывное дело. – 2004. – № 94/51. – С. 10–21.
15. Мосинев В.Н. и др. Разрушение горных пород. – М.: Недра, 1975. – С. 152–153.
16. Патент РФ 2366891. Способ образования врубовой полости.
17. Грешилов А.А., Егупов Н.Д., Матушенко А.М. Ядерный щит – М.: Логос, 2008. – С. 239–241.
18. Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. Модели динамического деформирования и разрушения горных пород. – М.: Наука, 1990. – С. 32–75.
19. Барон В.Л., Кантор В.Х. Техника и технология взрывных работ в США. – М.: Недра, 1989.
20. Дугарцыренов А.В. Физическая природа и механизм разрушения горной породы при камуфлетном взрыве // Взрывное дело. – 2011. – № 106/63. – С. 112–126. **ПДБ**

Адушкин Виталий Васильевич – академик РАН, научный руководитель, ИДГ РАН,
Бригадин Иван Владимирович – кандидат технических наук, научный консультант,
e-mail: ivanbrigadin2008@ya.ru, ООО «Промстройвзрыв»,

Кочарян Геворг Грантович – доктор физико-математических наук, профессор,
зав. лабораторией, ИДГ РАН,

Краснов Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, научный консультант,
ООО «Промстройвзрыв»,

UDC 550.344; 550.348; 622.235

TO THE QUESTION ABOUT THE MECHANISM OF DESTRUCTION OF THE SOLID ROCK UNDERGROUND EXPLOSION

Adushkin V.V.¹, Academician of Russian Academy of Sciences, Scientific Supervisor,
Brigadin I.V.², Candidate of Technical Sciences, Scientific Consultant, e-mail: ivanbrigadin2008@ya.ru,
Kocharyan G.G.¹, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Laboratory,
Krasnov S.A.¹, Candidate of Technical Sciences, Scientific Consultant,

¹ Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences (IGD RAS), 119334, Moscow, Russia,

² LLC «Promstroivzryv», 190031, Saint-Petersburg, Russia.

On the basis of experimental data on underground explosion, including nuclear, presents the postulates of physical models destruction of solid rock. The hypothesis of a new physical phenomenon that bears a latent character, which consists in increasing the strength of the rocks from the values characteristic of the open surface to the pressure phase transformations depending on the location in the structural-tectonic block.

Key words: the failure model, the hypothesis of a structural-tectonic block, tensile fracture, the pressure of the phase transition.

REFERENCES

1. Rodionov V.N., Adushkin V.V., Kostyuchenko V.N. *Mekhanicheskii effekt podzemnogo vzryva* (Mechanical effect of underground explosion), Moscow, Nedra, 1971.
2. Kutuzov B.N. *Metody vedeniya vzryvnykh rabot*, ch. 2, *Vzryvnye raboty v gornom dele i promyshlennosti* (Blasting methods. Part 2: Blasting in mining and industry), Moscow, Izd-vo Gornaya kniga, 2008, pp. 57–92.
3. Mangush S.K., Kryukov G.M., Fisun A.P. *Vzryvnye raboty pri podzemnoi razrabotke poleznykh iskopayemykh*. Uchebnik dlya vuzov (Blasting in underground mineral mining. Textbook for high schools), Moscow, Izd. AGN, 2000.
4. Copyright certificate USSR no 1765462.
5. Kuznetsov V.M. *Vzryvnoe delo*. 1982, no 83/40, pp. 85–92.
6. Adushkin V.V., Spivak A.A. *Podzemnye vzryvy* (Underground blasting), Moscow, Nauka, 2007.
7. Kocharyan G.G., Spivak A.A. *Deformirovanie blochnykh massivov skal'nykh porod* (Deformation of hard block rock masses), Moscow, IKTs «Akademkniga», 2003.
8. Kutuzov B.N. *Spravochnik vzryvnika* (Shot firer's manual), Moscow, Nedra, 1988.
9. Shemyakin E.I. *Vzryvnoe delo*. 2000, no 93/50, pp. 4–12.
10. Dzhigrin A.V. *Problemy vzryvnogo dela* (Problems in blasting), Moscow, MGGU, 2002.
11. Isakov A.A. *Vzryvnoe delo*. 1986, no 89/46.
12. Kocharyan G.G. *Vzryvnoe delo*. 1990, no 90/47.
13. Adushkin V.V., Spivak A.A. *Zapiski Gornogo instituta*. 2001, vol. 148(1), pp. 21–32.
14. Shemyakin E.I. *Vzryvnoe delo*. 2004, no 94/51, pp. 10–21.
15. Mosinets V.N. *Razrushenie gornykh porod* (Rock failure), Moscow, Nedra, 1975, pp. 152–153.
16. Patent RU 2366891.
17. Greshilov A.A., Egupov N.D., Matushchenko A.M. *Yadernyi shchit* (Nuclear shield), Moscow, Logos, 2008, pp. 239–241.
18. Zamyshlyayev B.V., Evterev L.S. *Modeli dinamicheskogo deformirovaniya i razrusheniya gornykh porod* (Models of dynamic deformation and failure of rocks), Moscow, Nauka, 1990, pp. 32–75.
19. Baron V.L., Kantor V.Kh. *Tekhnika i tekhnologiya vzryvnykh rabot v SShA* (Blasting technology and equipment in USA), Moscow, Nedra, 1989.
20. Dugartsyrenov A.V. *Vzryvnoe delo*. 2011, no 106/63, pp. 112–126.