

5. Пилюгин В. И. Обоснование параметров расположения и способов повышения устойчивости выработок, поддерживаемых в обрушенной и уплотненной толще пород: автореферат дис. к.т.н. 05.15.02. ДПИ – Донецк, 1988. – 16 с.
6. ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: из-во стандартов, 2005. – 56 с.
7. Чаповский Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов/ Е.Г. Чаповский. Изд. 4-е. – М.: Недра, 1975. – 304 с.
8. Волдарский Е. Т. Планирование и организация измерительного эксперимента/ Е. Т. Волдарский, Б. Н. Малиновский, Ю. М. Туз. – К.: Вища школа, 1987. – 280 с.
9. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике/ Л. И. Седов. – М., 1965. - 388 с.
10. Фисенко Г. Л. Предельное состояние горных пород вокруг выработок/ Г. Л. Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
11. Булычев В. Г. Механика дисперсных грунтов/ В. Г. Булычев. Под ред. проф. Н. Н. Черкасова. – М.: Стройиздат, 1974. – 227 с.
12. Цытович Н. А. Механика грунтов (краткий курс) / Н. А. Цытович, учебник для строит. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1983. – 288 с.

УДК 622.235.361

## МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ПОД ВЛИЯНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

*К.С. Ищенко, И.Л. Кратковский, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова  
НАН Украины  
А.С. Баскевич, ГВУЗ «УГХТУ», Украина*

Приведены результаты гранулометрического и рентгеноструктурного анализов мелкодисперсных фракций пород магматического, метаморфического и осадочного генезиса, разрушенных динамическими нагрузками.

Процесс динамического разрушения анизотропных полиминеральных горных пород, отличающихся наличием большого количества дефектов их внутреннего строения в виде межзерновых контактов, слагающих породу минералов, интрагранулярных микротрещин и плоскостей спайности в настоящее время недостаточно исследован.

Применяемые методы динамического разрушения таких пород должны обеспечивать не только необходимое дробление и гранулометрический состав горной массы, но и концентрацию динамической энергии в заданных направлениях для исключения разубоживания полезного ископаемого при интенсивном ведении горных работ на поверхности, а в подземных условиях – управляемое разрушение при проходке выработок различного технологического назначения в напряженных массивах.

С целью разработки ресурсо- и энергосберегающих способов динамического разрушения пород сложного строения были проведены эксперименты по изучению структурных изменений пород различного генезиса (гранитов, песчаников, известняков и железистых кварцитов), которые подвергались различным видам динамического нагружения (взрыв, высокоскоростной удар).

Разрушение образцов горных пород высокоскоростными ударными нагрузками производили на центробежной установке для ударных испытаний материалов [1] – специальном

стенде (рис. 1, а, б), включающим вращающуюся каретку с приводом от электродвигателя переменной мощности (200-600 Вт, 5000-10000 об/мин), опорную тумбу, защитный кожух и пульт управления, мишени, представляющих собой систему стальных вертикальных плит (отбойных пластин), обеспечивающих изменение угла встречи образца при ударе.



а



б

Рис. 1. Центробежная установка для ударных испытаний материалов: а – общий вид стенда; б – вращающаяся каретка стенда

Угол встречи образца со стальными отбойными пластинами (мишенью), определяемый углом их поворота ( $40^\circ$ ) изменялся от 0 до  $32^\circ$ . Такие угловые соотношения, согласно [2] обеспечивают наилучшие результаты дробления за счет оптимального соотношения растягивающих, сжимающих и касательных (сдвиговых) разрушающих нагрузок. Вращающаяся каретка (рис. 1, б), закрепленная с осью вращения вала привода, состоит из вертикального приемного лотка, и двух горизонтальных оппозитных цилиндрических патрубков диаметром 50 мм. Испытуемые образцы полиминеральных горных пород в виде кубиков с размером ребра 20-25 мм загружались в приемный лоток, и отбрасывались центробежной силой по горизонтальным патрубкам вращающейся каретки в сторону мишеней, обеспечивая при этом максимальную скорость встречи с ними.

Для исследования характера взрывного разрушения пород различного генезиса (магматических гранитов, метаморфических железистых кварцитов, хемогенных известняков и осадочных песчаников) использовали мелкодисперсные фракции взорванных в условиях полигона моделей из натуральных материалов [3-6].

Продукты разрушения, как полученные на центробежной ударной установке, так и после взрыва, рассеивали на лабораторных ситах с размерами ячеек 400, 315, 160, 100 и 50 микрон, определяли массу каждой фракции, а гранулометрический состав мельчайшей фракции (0-100 микрон) изучали при увеличении  $240\times$  с помощью петрографического микроскопа МП-2, укомплектованного интеграционным столиком ИСА для количественных измерений. Данные микрогранулометрии обрабатывались методом приближения экспериментальных кривых к двухпараметрическим зависимостям, с использованием стандартных программ на языке BASIC, а по данным ситового анализа строились гистограммы фракционного состава в Microsoft Excel.

Результаты гранулометрического анализа приведены на рис.2

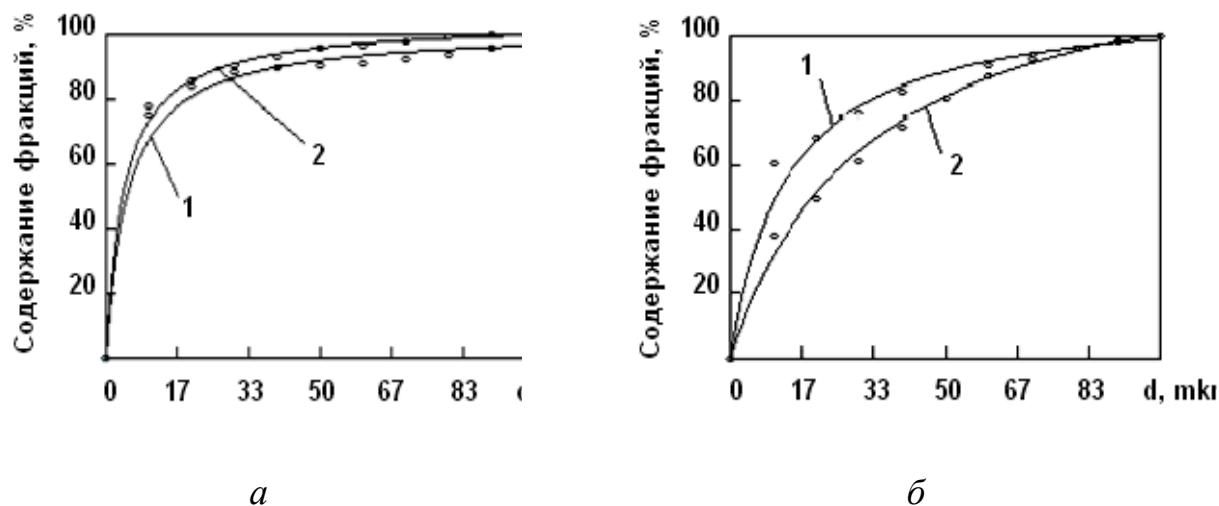


Рис. 2. Кумулятивные кривые гранулометрического состава мелкодисперсной фракции (0-100 микрон) образцов песчаника шахты им. А.А. Скочинского (а) и Ватутинских урано-держущих гранитов (б) разрушенных динамическими нагрузками: 1 – взрыв; 2 – высокоскоростной удар

Анализ кумулятивных кривых (рис. 2, а, б) фракционного состава показывает в пределах ошибки измерений практически их полную идентичность, характеризуя, тем самым, почти полное сходство, по крайней мере, на микроуровне, характера разрушения песчаников при воздействии на них взрывных и ударных нагрузок.

При микроскопическом изучении мелкодисперсных фракций (0-100 микрон) пород различного генезиса (известняков, песчаников, железистых кварцитов и метасоматически измененных гранитов), полученных при ударном и взрывном воздействиях, было установлено, что бескварцевые породы (известняки) состоят на 90-95 % из частиц кальцита и на 5-10 % из остроугольных обломков кварца, входящего в состав известняка в качестве примесей. Мелкодисперсные фракции железистых кварцитов и песчаников на 90-99 % состоят из остроугольных кварцевых обломков и на 1-10 % рудного минерала – магнетита. Данное обстоятельство можно объяснить высокой плотностью дефектов строения в кварце, наблюдаемых в прозрачных петрографических шлифах в виде многочисленных субпараллельных полосок, состоящих из пузырьков газа, и представляющих собой не что иное, как «залеченные» микротрещины.

При действии на породу высокоскоростных ударных и взрывных нагрузок вновь образованные трещины в кварцитах и песчаниках наследуют плоскости наибольшего ослабления структурных связей, т.е. естественные микротрещины и межзерновые границы.

Почти полное сходство характера разрушения при действии ударных и взрывных нагрузок обнаруживают такие породы как криворожские железистые кварциты (метаморфические породы), песчаники, хемогенные известняки, доломиты и доломитизированные известняки Донбасса (осадочные породы).

Установлено также, что характер кумулятивной кривой гранулометрического состава (рис. 2, а) в большей мере определяется плотностью дефектов строения полиминеральной горной породы, нежели исходными размерами минеральных зерен.

Для получения большей информативности о характере разрушения песчаников по данным гранулометрии (таблицы замеров, кривая грансостава) определяли такие параметры как средневзвешенный размер зерен  $\bar{d}$ , их медианный размер  $\bar{d}_{50}$ , т.е. средний размер 50 % фракции 0-100 микрон, и квантили 25 %  $\bar{d}_{25}$  и 75 %  $\bar{d}_{75}$ , по которым устанавливали коэффи-

коэффициент равномерности дробления  $S_0$  по соотношению  $S_0 = (\bar{d}_{75} / \bar{d}_{25})^{1/2}$  и коэффициент асимметрии  $S_k = (\bar{d}_{75} \cdot \bar{d}_{25}) / \bar{d}_{50}^2$  (табл.).

Таблица

Гранулометрические характеристики мелкодисперсной фракции пород разного генезиса, разрушенных ударными и взрывными нагрузками

Порода	Воздействие	Средний размер частиц, $\bar{d}$ , мкм	Квартиль-50 (медианный размер частиц), $d_{50}$ , мкм	Квартиль-25, $d_{25}$ , мкм	Квартиль-75, $d_{75}$ , мкм	Коэффициент сортировки частиц (равномерности дробления), $S_0^*$	Коэффициент асимметрии, $S_k$
Ураноносные граниты, Ватутинское месторождение	удар	31,35	18,46	7,27	37,89	2,28	0,81
	взрыв	23,97	10,55	8,92	26,77	1,73	2,15
Песчаник, шахта им. А.А. Скочинского	удар	16,24	3,94	1,35	10,98	2,85	0,95
	взрыв	19,79	4,95	1,67	14,29	2,92	0,97
Известняк, ДФДК	удар	28,72	10,05	3,31	25,07	2,75	0,82
	взрыв	24,17	9,34	3,26	24,79	2,76	0,93
Железистый кварцит НКГОК	удар	67,01	35,06	12,71	64,02	2,24	0,66
	взрыв	66,71	34,49	12,07	63,75	2,30	0,65

Данные таблицы свидетельствуют о том, что высокоскоростные ударные нагрузки обеспечивают более интенсивное дробление по сравнению с действием на породу взрывных нагрузок. Равномерность дробления мелкодисперсных частиц, образующихся в основном в зоне контакта образца с мишенью при ударном разрушении и на границе «ВВ-порода» при взрывном воздействии далека от совершенства, обычно коэффициент равномерности дробления  $S_0$  колеблется в интервале значений 1,5-3, причем, чем ближе  $S_0$  к значению 1,5, тем более равномерно раздроблен разрушаемый материал.

С целью получения более полной информации о структурных изменениях, происходящих в горных породах различного генезиса при действии на него различных видов нагружения, мелкодисперсные фракции (0-100 микрон) были исследованы рентгеноструктурным методом. Мелкодисперсные фракции образцов пород подвергались  $Cu-K_{\alpha}$ -излучению на лабораторной рентгеновской установке ДРОН-3. В качестве эталонных образцов использовались сколы ненагруженных материнских пород (песчаников, известняков, железистых кварцитов и метасоматических гранитов).

Анализ дифрактограмм мелкодисперсных фракций известняков, песчаников и железистых кварцитов показал несущественные изменения структуры мелкодисперсных фракций этих пород при различных видах нагружения. В частности, при ударном воздействии наблюдается незначительная аморфизация кварца песчаника и железистого кварцита, что свидетельствует о наличии деформаций смятия (раздавливания) в точке контакта образца с мишенью и суще-

ственное (почти двойное) усиление интенсивности линии анортита (в песчаниках, рис.3, а, б), что говорит о более интенсивном разрушении данного минерального компонента при большем энергетическом воздействии на породу взрывных нагрузок по сравнению с высокоскоростным ударным нагружением [6].

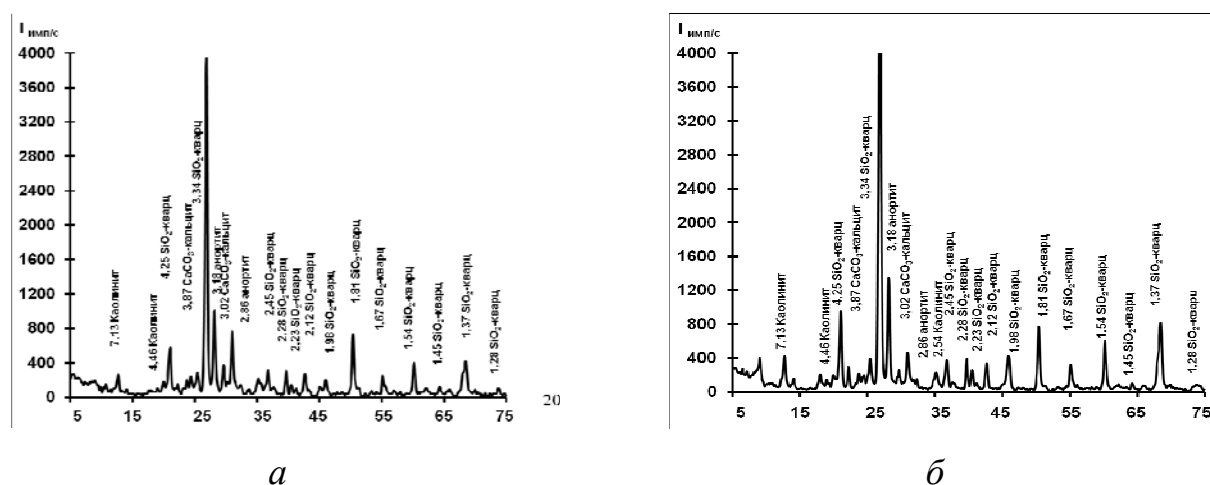


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы мелкодисперсной фракции песчаника шахты им. Скочинского, разрушенного различными видами энергии: а – высокоскоростной удар; б – взрывное воздействие

Анортит (основной плагиоклаз) по сравнению с кварцем характеризуется меньшей плотностью дефектов строения. В качестве ослабления структурных внутренних связей в данном минерале служат плоскости спайности – дефекты строения в минералах более высокого порядка по сравнению с микротрещинами.

Что касается вязких метасоматических урансодержащих гранитов (Ватутинское урановое месторождение, Кировоградская обл.), то в характере их ударного и взрывного разрушения наблюдаются некоторые различия, что подтверждается видом гранулометрических кривых (рис. 2, б).

Изучение кривых гранулометрии мелкодисперсных пылевидных частиц показало, что при динамическом нагружении в пробе 0-100 мкм преобладают более крупные частицы кварца, полевых шпатов и слюд (примерно в равной пропорции): при взрывном разрушении средне-взвешенный диаметр частиц  $d_{50}$  равен 23,97 мкм, а при разрушении свободным ударом –  $d_{50}$  составляет 31,35 мкм.

Методами микроструктурного анализа ориентированных петрографических шлифов метасоматического гранита Ватутинского месторождения, выполненного с помощью универсального столика Федорова ФС-5 и интегратора ИСА, смонтированных на поляризационном микроскопе МП-2, установлено следующее. В отличие от так называемых «идеальных» гранитов «усредненного» состава (примерно одинаковое количество кварца, кислого плагиоклаза и ортоклаза – главных породообразующих минералов – и до 10 % биотита, мусковита, амфибола и других второстепенных минералов) Ватутинские граниты обеднены кварцем (20-25 %), характеризуются повышенным содержанием кислого плагиоклаза альбит-олигоклазовой группы (40-45 %), амфиболов щелочного ряда групп рибекита и тремолит-актинолита (20 %).

В результате интерпретации узора ориентировки структурной диаграммы удалось установить, что оптические оси кварца ориентированы по *e*-типу [7], когда оптические оси кварца совпадают с направлением вектора линейности минеральных агрегатов. Такая ориентировка, согласно исследованиям, проведенным в [7], характерна для малоглубинных гранитов, где преобладает низкотемпературная модификация кварца с почти полным отсутствием дефектов строения в виде залеченных микротрещин. При динамическом (взрывном) нагружении полиминеральной горной породы, как установлено в работе [8] наиболее интенсивно разру-

шаются те минералы, в которых плотность дефектов строения наивысшая. Для гранитов Ватутинского месторождения максимальная плотность дефектов строения в виде крустификационных трещин и плоскостей спайности наблюдается в плагиоклазах.

Изучении мелкодисперсной фракции метасоматических гранитов светооптическим и рентгеноструктурным методами показало, что при ударном нагружении в составе мелкодисперсных фракций преобладает мельчайшие зерна кварца, плагиоклаза и кальцита (рис.4, а). При воздействии на данную породу взрывных нагрузок в составе частиц фракции 0-100 мкм обломки альбита и кальцита доминируют над частицами кварца. В рентгеновском спектре появляются линии, характерные для урансодержащих минералов, Рентгеновские дифрактограммы мелкодисперсной фракции урансодержащих гранитов приведены на рис. 4.

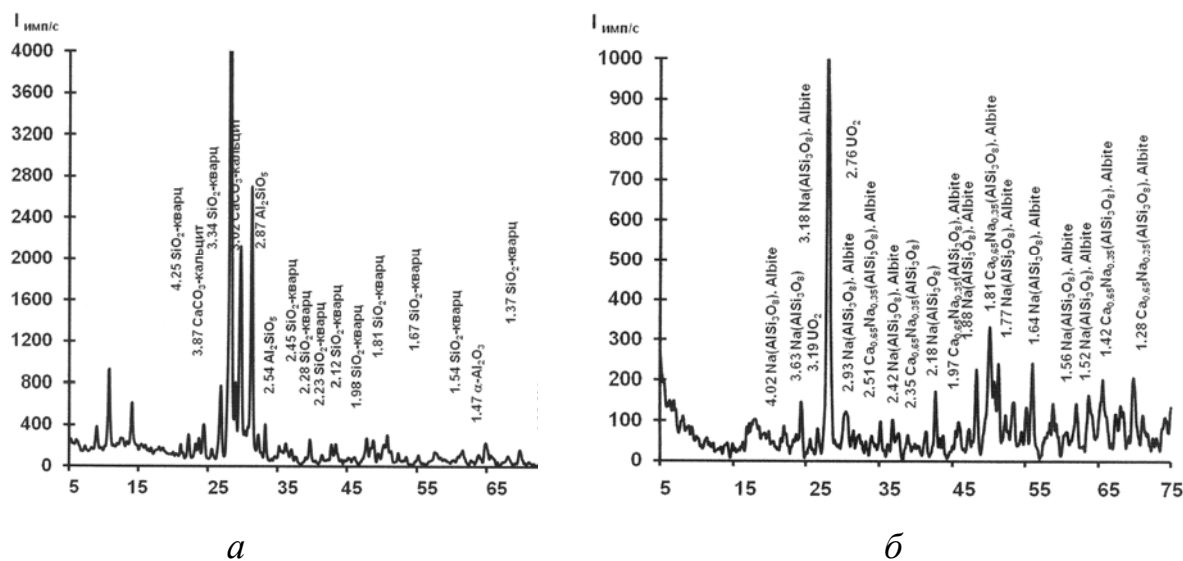


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы мелкодисперсной фракции урансодержащего гранита разрушенного различными видами энергии: а – высокоскоростной удар; б – взрывное воздействие

**Выводы.** С помощью светооптического и рентгеноструктурного методов установлена идентичность разрушения песчаника на микроуровне при действии на породу взрывных и ударных нагрузок.

Интерпретация данных рентгеноструктурного анализа показала, что при действии ударных нагрузок на полиминеральную горную породу в разрушении среды значительную роль играют деформации смятия (раздавливания), при взрывном воздействии более интенсивное разрушение наблюдается не только для кварца, обладающего максимальной плотностью дефектов строения в виде микротрещин и многочисленных включений, но также и для минералов с более высоким уровнем дефектов строения (плоскостей спайности), обычно плохо реализуемых в поверхности раздела при ударном воздействии.

Данные экспериментов по динамическому разрушению (взрыв, удар) могут быть использованы для разработки энергосберегающих способов разрушения полиминеральных горных пород.

#### Список литературы

1. А.с. 1490573 СССР, МКИ<sup>3</sup> 01Р 21/00. Центробежная установка для ударных испытаний материалов / Э.И. Ефремов, В.И. Лисица, И.Н. Мячина и др. (СССР) –№ 25769870/22; Заявл. 05.06.87; Оpubл. 30.06.89. – Бюл. № 24. – 3 с.
2. Лисица, В.И. Дробление дисперсной среды при свободном ударе / В.И.Лисица, Н.И. Мячина, В.В.Уваров // Повышение эффективности разрушения горных пород: Сб. науч. тр. ИГТМ АН УССР. – К.: Наук. думка, 1991. – С.100-103.
3. Петренко, В.Д. Влияние микроструктуры магнетитовых кварцитов на результаты

взрывного разрушения / В.Д. Петренко, И.Л. Кратковский, Л.А. Логвина // Повышение эффективности разрушения горных пород. Сб. науч. тр. ИГТМ АН УССР, Киев: Наук. думка, 1991. – С.72-76.

4. Ефремов, Э.И. Экспериментальные результаты разрушения полиминеральных сред при взрывном и механическом воздействии / Э.И. Ефремов, В.Д. Петренко, И.Л. Кратковский, В.В. Шеленок // Материалы Международной конференции «Высокоэнергетическая обработка материалов», Днепропетровск, 1995. – С.44-49.

5. Ефремов, Э.И. Влияние типов ВВ на интенсивность взрывного разрушения известняков и доломитов / Э.И. Ефремов, И.Л. Кратковский, А.В. Пономарев, Е.В. Николенко // Сб. науч. тр. Нац. горн. Акад. Украины, 2001 – Т.3 – № 11. – С. 37-42.

6. Ищенко, К.С. Изменение структуры песчаника при действии динамических нагрузок / К.С. Ищенко, И.Л. Кратковский, А.С. Баскевич // “Форум гірників 2011”: Матеріали міжнародної конференції, (Дніпропетровськ 12 жовтня-15 жовтня 2011) / М-во освіти і науки, молоді та спорту ДВНЗ «Національний гірничий університет» – Д.: ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2011.– С. 95-103.

7. Кратковский, И.Л. Влияние режима кристаллизации гранитов на мобильность системы трансляционного скольжения в кварце / И.Л. Кратковский // Науковий вісник НГУ. – 2009. – № 6. – С.54-63.

8. Ефремов, Э.И. О влиянии фракционного состава кварцсодержащих пород на содержание силикозоопасной пыли в продуктах их разрушения / Э.И. Ефремов, В.Д. Петренко, И.Л. Кратковский, С.В. Шевченко // Докл. АН Украины, 1993 – № 5. – С.45-49.