

УДК 622.831:519.688

В.С. Куксенко, Х.Ф. Махмудов, М.Д. Ильинов, З. Абдурахмонов

КУКСЕНКО ВИКТОР СТЕПАНОВИЧ – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физики прочности (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург).

E-mail: Victor.Kuksenko@mail.ioffe.ru

МАХМУДОВ ХАЙРУЛЛО ФАЙЗУЛЛАЕВИЧ – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физики прочности (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург), доцент кафедры безопасности производств (Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург).

E-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

ИЛЬИНОВ МИХАИЛ ДМИТРИЕВИЧ – кандидат технических наук, заведующий лабораторией (Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург).

E-mail: ilinov_md@spmi.ru

АБДУРАХМОНОВ ЗАФАР – аспирант (Худжандский государственный университет им. академика Б. Гафурова, Таджикистан).

Количественный микроанализ образцов мрамора (CaCO_3) в условиях объемного сжатия

Так как массив горных пород находится в условиях всестороннего сжатия, появилась необходимость исследовать образцы горных пород в этих условиях. Эксперименты проводились на образцах мрамора (CaCO_3) в камере высокого давления. В результате предварительных испытаний были определены характерные точки, при достижении которых образцы разгружались и извлекались для изготовления шлифов и аншлифов. Для исследования микроструктурных нарушений в образцах мрамора использовали метод оптической микроскопии с подсчетом параметров трещин в шлифах (метод ВНИГРИ) и автоматический количественный анализ структурно-текстурных характеристик с помощью устройства «Квантимет-720», а также метод акустической эмиссии (АЭ). Хрупко разрушающийся материал может быть переведен в пластический деформируемый. Динамические проявления, т.е. бурное разрушение и предшествующая этому генерация высокоэнергетических упругих импульсов, могут быть уменьшены.

Ключевые слова: микроструктура, мрамор, давления, оптическая микроскоп, акустическая эмиссия, деформирования.

Наблюдения за процессами разрушения [7, 11–14], как техногенными [15], так и тектоническими [3–10], протекающими в земной коре, ведутся уже давно, но этих наблюдений далеко не достаточно, чтобы по ним научиться прогнозировать место, время и мощность динамических явлений. Эта недостаточность знаний обусловлена относительно бедной информацией о напряженно-деформированном состоянии и реакции на его изменение в земной коре. Более того, в настоящее

время не совсем ясно, за какими процессами необходимо следить, какие методы контроля этих процессов должны применяться [3–10]. В связи с этим особую значимость приобретают лабораторные исследования процесса разрушения горных пород, которые позволяют промоделировать различные условия развития разрушения в массиве горных пород, используя при этом различные методы контроля над процессом. Поскольку массив горных пород находится в условиях всестороннего сжатия, то появилась необходимость исследовать образцы горных пород в условиях всестороннего сжатия. Эксперименты проводились на образцах мрамора в камере высокого давления, при этом использована материальная база Национального минерально-сырьевого университета «Горный». Ниже приведена фотография экспериментальной установки: фото (а) – сервогидравлическая система MTS 4500 кН в комплекте со стабилометром, фото (б) – комплект оборудования для исследования процессов микро- и макротрещинообразования в скальных горных породах с помощью акусто-эмиссионных датчиков при сложных режимах нагружения.



Фото а



Фото б

Из предварительных испытаний были определены характерные точки, при достижении которых образцы разгружались и извлекались для изготовления шлифов и аншлифов. На рис. 1 приведены схема и этапы нагружения образцов горных пород.

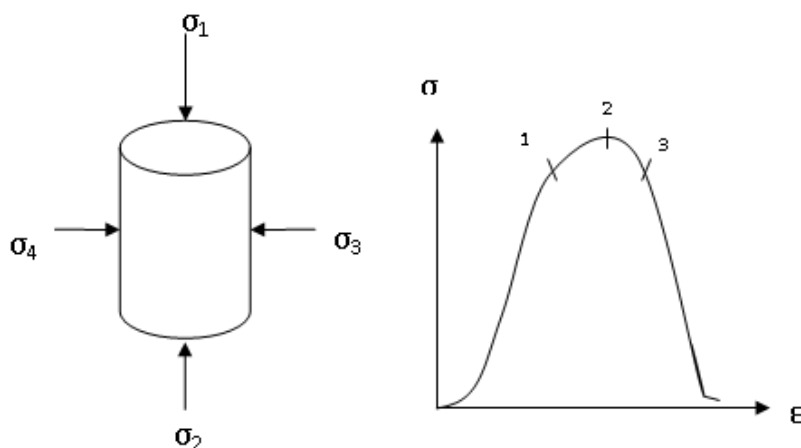


Рис. 1. Схема и этапы нагружения образцов горных пород

Для исследования микроструктурных нарушений в образцах мрамора использовались метод оптической микроскопии с подсчетом параметров трещин в шлифах (метод ВНИГРИ) и автоматический количественный анализ структурно-текстурных характеристик с помощью устройства «Квантимет-720», а также метод акустической эмиссии.

Первый этап нагружения соответствует примерно 80–85% от разрушающей нагрузки σ_p при боковых значениях давлений $\sigma_2 = \sigma_3 = 1, 3, 5, 10$ МПа. Второй этап нагружения соответствует 90–100% от σ_p , т.е. когда порода находится на пределе прочности. Третий этап соответствует запредельной области при тех же боковых давлениях.

Рассмотрим каждый этап (или стадию деформирования) подробно при каждом изменении бокового давления.

При боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 1$ МПа увеличение нагрузки приводит к следующим текстурно-структурным изменениям: усиливается процесс грануляции, выраженный в дроблении крупных зерен на мелкие, исчезает первичная структура зерен, по полисинтетическим двойникам идет истирание зерен, меняются контакты из прямолинейных в вогнуто-выпуклые.

На первом этапе деформирования образуются в основном минеральные трещины (трещины I-генерации), а при дальнейшем повышении нагрузки появляются тоже минеральные трещины, но по своей морфологии это трещины скалывания (трещины II-генерации). Появление открытых трещин (III-генерации) наблюдается уже на I–II стадиях деформирования. Эти трещины расположены параллельно и под углом 40–45° к главной оси нагружения (σ_1). Усиливается образование минеральных трещин по спайности с образованием пелитоморфного кальцита.

В целом разрушенность породы в запредельной области составляет 65–70%. Объемная плотность трещин (T_0) увеличивается на II этапе деформирования почти в 4 раза по сравнению с I этапом (см. табл.1).

При боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 3$ МПа на первом этапе деформирования отмечены те же самые изменения, но образование минеральных трещин происходит менее интенсивно.

Ниже приводятся таблицы трещинных параметров, полученных с помощью методики ВНИГРИ (табл. 1) и с помощью «Квантимера-720» (табл. 2). Изменение породы в целом идет по линии интенсивной грануляции или рекристаллизации. Порода на III этапе деформирования при $\sigma_2 = \sigma_3 = 3$ МПа изменена примерно на 70–75%.

Таблица 1

Трещинные параметры для мрамора, испытанного в условиях всестороннего сжатия на разных этапах деформирования (по методике ВНИГРИ)

Этап	Достигнутое напряжение σ_1 , МПа	Боковое давление $\sigma_2 = \sigma_3$, МПа	Объемная плотность минер. трещин (I-, II-ген.) T_m , I/м	Объемная плотность открытых трещин (III-ген.) T_0 , I/м	Накопление АС, N
I	64	1	20	16	448
	85	3	80	18	512
	112	5	200	21	704
	116	10	500	43	800
II	84	1	80	78	2048
	101	3	320	26	960
	122	5	370	37	594
	167	10	800	51	467
III	132	3	450	54	896
	94	5	900	63	1408
	82	10	1800	68	1024

Результаты обсчета структурно-текстурных показателей на «Квантимете-720» для образцов мрамора в опытах на всестороннее сжатие

Этап	Боковое давление $\sigma_2 = \sigma_3$ МПа	Площадь пустотного пространства А, %	Абсолютная удельная поверхность S, мм ⁻¹	Периметр пустот Р, мм ⁻¹	Фактор формы порогового пространства F	Коэффициент ориентировки пор и трещин на ед.пл. К		
I	Исход.	2,0	3,5	4,1	0,182	0,238		
		2,2	4,3	4,3	0,154			
	1	2,5	4,0	4,8	0,174		1,046	
		2,3	4,2	4,1	0,160			
	3	5,8	6,4	6,6	0,157		1,119	
		5,2	7,2	6,4	0,144			
	5	2,2	3,7	4,4	0,182		1,146	
		2,3	4,2	3,7	0,162			
	10	4,7	7,2	6,8	0,136		1,020	
		4,6	7,3	6,6	0,133			
II	1	2,5	4,0	4,8	0,174	1,046		
		2,3	4,2	4,1	0,160			
	3	3,1	4,4	5,1	0,183		1,106	
		3,0	4,8	4,3	0,161			
	5	5,6	8,3	9,0	0,128		1,074	
		5,2	8,9	8,3	0,116			
	10	2,9	5,4	6,2	0,140		1,002	
		2,6	5,5	5,2	0,133			
	III	1	7,7	11,4	12,9		0,110	1,072
			7,5	12,2	10,9		0,101	
3		6,5	8,0	9,4	0,143	1,076		
		6,1	8,6	7,8	0,129			
5		6,6	5,0	6,4	0,233	1,213		
		6,2	6,0	4,9	0,185			
10		11,1	12,1	13,3	0,124	1,125		
		11,1	13,6	11,9	0,110			

При боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 5$ МПа усиливается образование минеральных трещин по двойниковым швам, перпендикулярно к ним и под углом 75^0 , заполненных тонкозернистым пелитоморфным кальцитом. Трещины, пересекаясь между собой, образуют сетчатый рисунок. В запредельной области образуется больше трещин скалывания, открытые же разнонаправлены и составляют $T_0 = 63$ I/м.

При увеличении бокового давления до $\sigma_2 = \sigma_3 = 10$ МПа отмечается увеличение трещин всех выделенных генераций, и только в запредельной области (III этап нагружения) открытые трещины не увеличиваются. По-видимому, это происходит за счет влияния бокового давления и

снижения нагрузки (σ_1). На этом этапе нагружения контакты меняются на 60–70% по сравнению с исходным недеформированным образцом; процесс грануляции еще более усиливается. Почти все крупные зерна кальцита дробятся на зерна угловатой формы.

Сопоставление этих характеристик деформирования показывает, что увеличение бокового давления способствует хрупко-вязкому переходу в процессе разрушения, о котором свидетельствует процесс накопления АС. При малых $\sigma_2 = \sigma_3$ происходит хрупкое разрушение, отмечается появление отрывных трещин, с увеличением $\sigma_2 = \sigma_3$ увеличивается напряжение, необходимое для макроразрушения, т.е. каждая трещина отрыва образуется в поле более высоких напряжений. При дальнейшем возрастании $\sigma_2 = \sigma_3$ увеличивается доля пластических сдвигов, а количество отрывных трещин уменьшается, это приводит к уменьшению количества АС. Рисунки 2, а и 2, б демонстрируют, что происходит хрупкое разрушение образца на первой стадии нагружения.

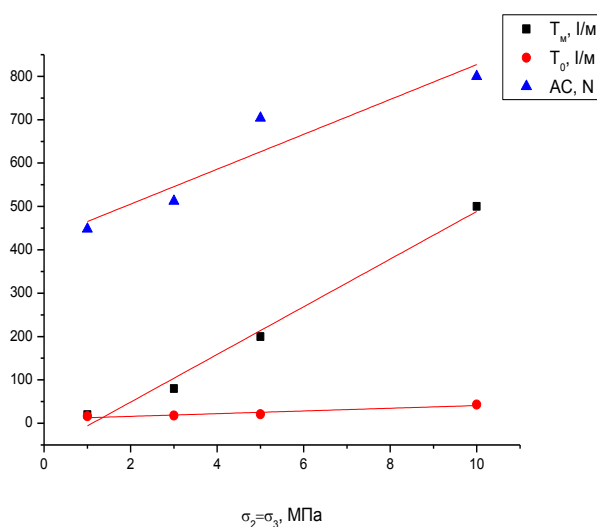


Рис. 2, а. Зависимости боковых напряжений от объемной плотности трещин всех выделенных генераций и числа АС на первой стадии нагружения образца из мрамора

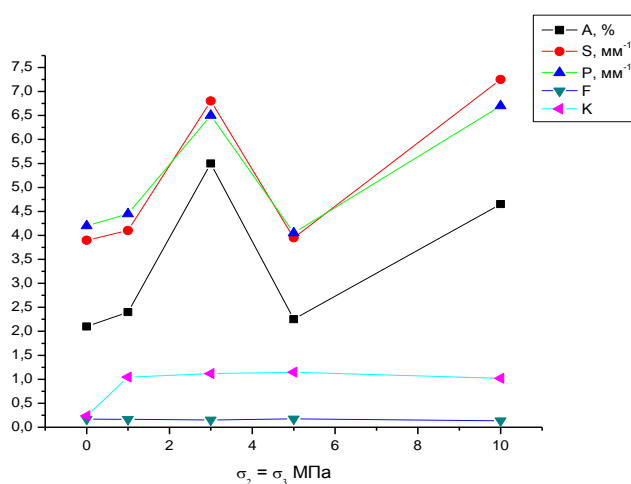


Рис. 2, б. Зависимости A, %; S, мм⁻¹; P, мм⁻¹; F; K от значений боковых давлений на первой стадии нагружения

На рисунках 3, а и 3, б показана выпуклая зависимость процесса накопления трещин от напряжений, что свидетельствует об увеличении роли пластической деформации.

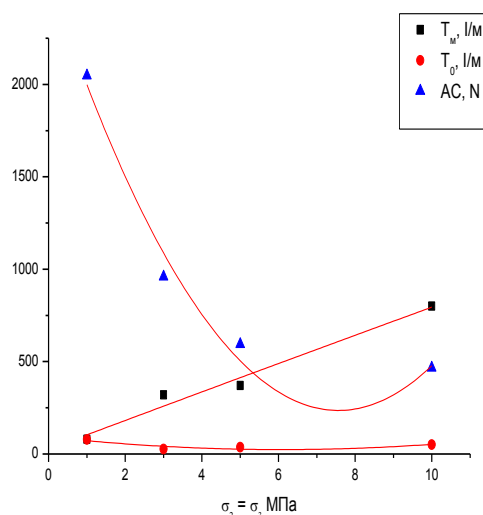


Рис. 3, а. Зависимости боковых напряжений от объемной плотности трещин всех выделенных генераций и числа АС на второй стадии нагружения образца из мрамора

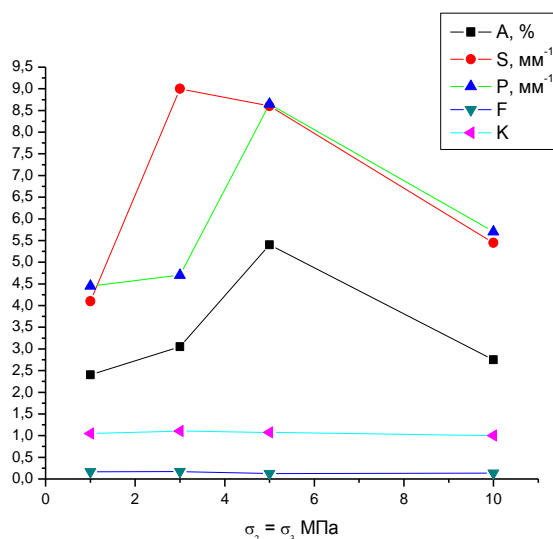


Рис. 3, б. Зависимости А, %; S, мм⁻¹; P, мм⁻¹; F; К от значений боковых давлений на второй стадии нагружения

Рост числа АС на начальной стадии связан с обычным увеличением числа разрывов при возрастании нагрузки, в которых имеется еще большая доля отрывных трещин, предшествующих сдвигам. Затем, при необходимом количестве отрывов, реализуются сдвиги как на элементарных (структурных) масштабах, так и при формировании многочисленного количества плоскостей скольжения. На этой стадии устанавливается спокойное течение пластической деформации. При хрупком разрушении наблюдается эффект разуплотнения (дилатансия), который обусловлен в основном отрывными трещинами, приводящими к резкому возрастанию процесса накопления АС.

Таким образом, приведенные результаты позволяют заключить, что всестороннее сжатие, налагающееся на одноосное нагружение, существенным образом изменяет характер процессов деформирования. Хрупко разрушающийся материал может быть переведен в пластический деформируемый. Динамические проявления, т.е. бурное разрушение и предшествующая этому генерация высокоэнергетических упругих импульсов, могут быть уменьшены.

Боковое давление меняет механизм или вид деформирования с отрывного на сдвиговой, облегчая тем самым релаксацию напряжений около образовавшихся дефектов.

При образовании трещин отрывного типа выделяется больше упругой энергии, чем при образовании трещин сдвигового типа таких же размеров.

Рисунок 4, а, б показывает, что на III этапе нагружения формируется очаг разрушения, и это отмечает область будущего макроразрыва.

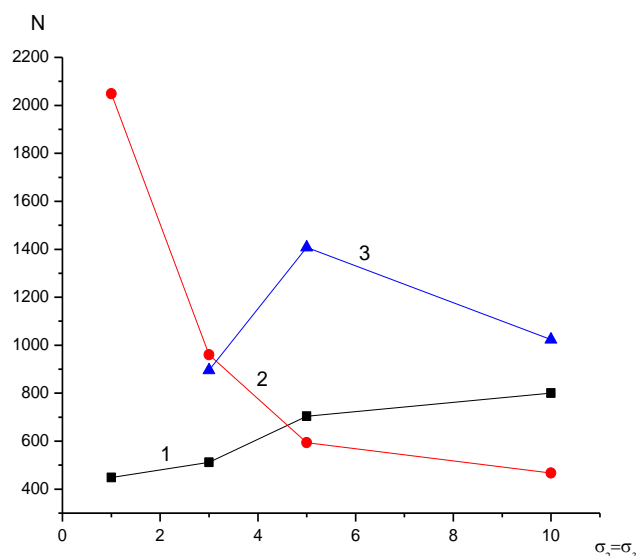


Рис. 4, а. Зависимости боковых напряжений от числа АС для всех трех стадий нагружения

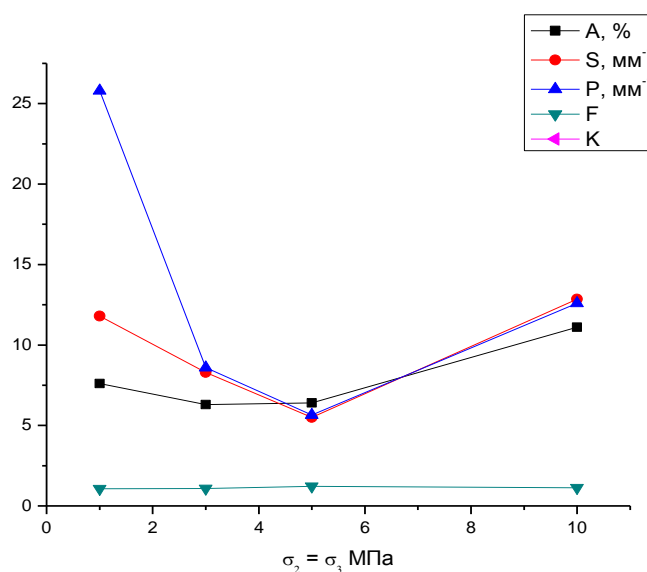


Рис. 4, б. Зависимости A, %; S, мм⁻¹; P, мм⁻¹; F; K от значений боковых давлений на третьей стадии нагружения

Количество АС резко снижается, АС в основном генерируется из области очага. При этом резко меняется характер деформирования. Третий этап нагружения при формировании очага разрушения протекает практически мгновенно, что связано с локализацией процесса разрушения.

Следует отметить, что детальный анализ этих участков с привлечением амплитудных спектров, коллективных эффектов позволит понять некоторые прогностические признаки в развитии очага разрушения и готовящегося динамического разрушения.

Кроме этого, как было отмечено выше, при исследовании образцов из мрамора был использован автоматический обсчет структурно-текстурных параметров на «Квантимет-720», основанный на сканировании пятна структуры. По каждому шлифам проводилось сканирование в двух направлениях (вдоль и поперек шлифа).

Таблица 2 свидетельствует, что высокие значения удельной поверхности пор и трещин (S) говорят об извилистости и преобладании мелких пор и трещин. Это видно в опытах на III этапе нагружения при боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 1$ МПа.

Увеличение площади пустотного пространства ($A, \%$) дает нам основание констатировать, что все испытанные образцы деформировались с приростом объема, наибольшее значение которого наблюдается для мрамора, деформированного при $\sigma_2 = \sigma_3 = 10$ МПа на III этапе нагружения, т.е. за пределом прочности.

Анализ аншлифов на электронном микроскопе показал, что в процессе деформирования увеличивается количество трещин сдвига, увеличиваются зоны дробления (грануляции) с образованием тонкозернистого пелитоморфного материала, увеличиваются зоны скольжения. Все это происходит за счет неравномерного распределения поля напряжения в образцах.

Выводы

1. Микроскопический анализ шлифов позволил выявить три типа генераций трещин, из которых вторая генерация (трещины сдвига) влияет на вязкий тип разрушения.
2. Увеличение нагрузки (σ_1) приводит к увеличению числа локально нарушенных участков (большое количество сколовых микротрещин) и перестройке структурного облика породы, выраженной в изменении контактов и грануляции зерен кальцита.
3. Увеличение бокового давления $\sigma_2 = \sigma_3$ до 10 МПа уменьшает дилатансию горных пород.
4. Выявлены остаточные деформации, выраженные в виде трансляций пластического скольжения, двойникования, что обусловлено вязким типом разрушения породы (мрамора).
5. С увеличением бокового давления число акустических сигналов на II этапе деформирования уменьшается, а на III этапе, т.е. в запредельной области, начинает увеличиваться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. Микросейсмичность и интенсивность релаксационных процессов в земной коре // ДАН. 2006. Т. 408, № 4. С. 532–534.
2. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В. А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // ДАН СССР. 1981. Т. 259, № 6. С. 1350–1353.
3. Журков С.Н., Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Панамарев А.В. Влияние механического поля на поляризацию горных пород // Докл. РАН. 1997. Т. 35, № 4. С. 470–472.
4. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Манжиков Б.Ц. Концентрационная модель разрушения твердых тел и прогнозирование катастрофических ситуаций крупномасштабных объектов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2010. № 4. С. 29–40.
5. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Мансуров В.А., Султонов У., Рустамова М.З. Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов // ФТПРПИ. 2009. № 4. С. 55–59.
6. Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф., Бенин А.В. Прогнозирование потери устойчивости нагруженных элементов конструкций методом акустической эмиссии // ПЖТФ. 2007. Т. 33, № 2. С. 31–35.
7. Махмудов Х.Ф. Поляризация мрамора в поле упругих сил при различных температурах // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 8. С. 41–45.
8. Махмудов Х.Ф. Термоактивационный механизм релаксации механоэлектрических эффектов в твердых диэлектриках // ЖТФ. 2011. Т. 81, вып. 1. С. 76–81.
9. Махмудов Х.Ф., Куксенко В.С. Электромагнитные явления при деформировании и разрушении твердых диэлектриков // ФТТ. 2005. Т. 47, № 5. С. 856–890.
10. Менжулин М.Г., Махмудов Х.Ф., Щербakov И.П. Термокинетическая модель формирования дефектов и динамика микротрещин в горных породах // Наука сегодня: теория, практика, инновации: коллективная монография: в 9 т. / под науч. ред. О.П. Чигишевой. Ростов-на-Дону, 2014. С. 159–187.
11. Соловьев С.П., Спивак А.А. Электромагнитные эффекты при релаксационных процессах в земной коре неоднородного строения // Докл. РАН. 2007. Т. 417, № 6. С. 823–827.

12. Baddari K., Frolov A.D., Tourtchine V., Makdeche S., Rahmoune F. Effect of temperature on the physical precursors of rock block failure., *Acta Geophysica*. 2012;(60)4:1007-1029.
13. Baddari K., Frolov A.D., Tourtchine V., Rahmoune F. An integrated study of the dynamics of electromagnetic and acoustic regimes during failure of complex macrosystems using rock blocks., *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2011;(44)3:269-280.
14. Catlos E.J., Jacob L., Baker C.B., Sorensen S.S., Çemen I., Linking microcracks and mineral zoning of detachment-exhumed granites to their tectonomagmatic history: evidence from the salihli and turgutlu plutons in western turkey (menderes massif). *Journal of Structural Geology*. 2011;(33)5:951-969.
15. Inspection and monitoring techniques for bridges and civil structures. Ed. FU. Gongkang. Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2005, 270 p.

Rock failure mechanisms in the surrounding rock masses with deep level tunnels and in the source areas of disastrous events

Kuksenko V.S., Makhmudov Kh.F., Ilinov M.D., Z. Abdurakhmonov

VIKTOR S. KUKSENKO, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Senior Researcher, Laboratory of Strength Physics (Physical-Technical Institute. Ioffe, RAS, St. Petersburg), e-mail: Victor.Kuksenko@mail.ioffe.ru; KHAIRULLO F. MAKHMUDOV, Candidate of Physical and Mathematical Sciences Laboratory of Strength Physics (Physical-Technical Institute. Ioffe, RAS, St. Petersburg), associate Professor Department of plant safety (National University of Mineral Resources "Mining", St. Petersburg), e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru; MIHAIL D. ILINOV, candidate of technical Sciences, head of laboratory (National University of Mineral Resources "Mining", St. Petersburg), e-mail: ilinov_md@smpi.ru; ZAFAR ABDURAKHMANOV, graduate (Khojend State University, Tajikistan), e-mail: hgu-rector@khujandi.com

Quantitative microscopic analysis marble (CaCO_3) under conditions of volumetric compression

Actual state of rocks in geosphere cannot be regarded as compressed hydrostatically because of complicated stress distribution under natural conditions. In this work, samples of marble were loaded stepwise in a high-pressure chamber with applying 12 combinations of lateral and axial deformation. The relative effect from lateral and uniaxial deformation on the mechanical behavior of marble was studied using acoustic emission (AE) technique. Posteriori changes in the sample morphology were analyzed using both optical microscopy and an automatic image analyzer Quantimet 720. The main finding of the work is the alteration of predominantly plastic and predominantly brittle behavior in dependence of the loading geometry.

Key words: Microstructure, marble, high pressure, optical microscopy, acoustic emission, strain.

REFERENCES

1. Adushkin V.V. Spivak A.A. Microseismicity and intensity of relaxation processes in the Earth's crust. DAN. 2006;(408)4:532-534. (in Russ.). [Adushkin V.V., Spivak A.A. Mikrosejsmichnost' i intensivnost' relaksacionnyh processov v zemnoj kore // DAN. 2006. T. 408. № 4. S. 532-534].
2. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Physical basis of the prediction of mechanical failure. Reports of the Academy of Sciences. 1981;(259)6:1350-1353. (in Russ.). [Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Fizicheskie osnovy prognozirovaniya mehanicheskogo razrusheniya // Doklady Akademii nauk. 1981. T. 259, № 6. S. 1350-1353].
3. Zhurkov S.N. Kuksenko V.S., Mahmudov H.F., Panamarev A.V. Reports of the Russian Academy of Sciences. 1997;(35)4:470-472. (in Russ.) [Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Mahmudov H.F., Panamarev A.V. // Doklady RAN. 1997. T. 35, № 4. S. 470-472].
4. Kuksenko V.S. Mahmudov H.F., Manzhikov B.Ts. Concentration model of fracture of solids and forecasting catastrophic situations of large-scale objects. Physical and technical problems of mining. 2010;4:29-40. (in Russ.). [Kuksenko V.S., Mahmudov H.F., Manzhikov B.C. Koncentracionnaja model' razrusheniya tverdyh tel i prognozirovanie katastroficheskikh situacij krupnomasshtabnyh ob'ektov // Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. 2010. № 4. S. 29-40].
5. Kuksenko V.S., Makhmudov Kh. F., Mansurov V.A., Sultonov U., Rustamova M.Z. Structural changes in the deformation of natural heterogeneous materials. Journal of Mining Science. 2009;4:55-59. (in Russ.).

- Russ.). [Kuksenko V.S., Mahmudov H.F., Mansurov V.A., Sultonov U., Rustamova M.Z. Strukturnye izmenenija pri deformacii prirodnyh geterogennyh materialov // FTPrPI. 2009. № 4. S. 55–59].
6. Kuksenko V.S., Tomilin N.G., Mahmudov H.F., Benin A.V. Prediction of buckling loaded structural elements acoustic emission method. *Journal of Mining Science*. 2007;(33)2:31-35. (in Russ.). [Kuksenko V.C., Tomilin N.G., Mahmudov H.F., Benin A.V. Prognozirovanie poteri ustojchivosti nagruzhennyh jelementov konstrukcij metodom akusticheskoy jemissii // PZhTF. 2007. T. 33, № 2. S. 31-35].
 7. Mahmudov H.F. Polarization of marble in the field of elastic forces at different temperatures. *Deformation and Fracture of Materials*. 2012;8:41-45. (in Russ.) [Mahmudov H.F. Poljarizacija mramora v pole uprugih sil pri razlichnyh temperaturah // Deformacija i razrushenie materialov. 2012. № 8. S. 41-45].
 8. Mahmudov H.F. Thermally activated relaxation mechanism of mechanical and electrical effects in solid dielectrics. *Tech*. 2011;(81)1:76-81. (in Russ.). [Mahmudov H.F. Termoaktivacionnyj mehanizm relaksacii mehanojelektricheskikh jeffektov v tverdyh dijelektrikah // ZhTF. 2011. T. 81, vyp. 1. S. 76-81].
 9. Mahmudov H.F., Kuksenko V.S. Electromagnetic phenomena during deformation and fracture of solid dielectrics. *FTT*. 2005;(47)5:856-890. (in Russ.) [Mahmudov H.F., Kuksenko V.S. Jelektromagnitnye javlenija pri deformirovanii i razrushenii tverdyh dijelektrikov // FTT. 2005. T. 47, № 5. S. 856-890].
 10. Menzhulin M.G., Mahmudov H.F., Shcherbakov I.P. Thermal and kinetic model of defect formation and dynamics of micro-cracks in rocks. *Science today: theory, practice and innovation: a collective monograph: 9 m. Under scientific, ed. O.P. Chigisheva. Rostov-on-Don, 2014, p. 159-187.* (in Russ.) [Menzhulin M.G., Mahmudov H.F., Shherbakov I.P. Termokineticheskaja model' formirovanija defektov i dinamika mikrotreshhin v gornyh porodah // Nauka segodnja: teorija, praktika, innovacii: kollektivnaja monografija: v 9 t. / pod nauch. red. O.P. Chigishevoj. Rostov-na-Donu, 2014. S. 159-187].
 11. Soloviev S.P., Spivak A.A. Electromagnetic effects in the relaxation processes in the crust of the inhomogeneous structure. *Reports of the Academy of Sciences*. 2007;(417):823-827. (in Russ.) [Solov'ev S.P., Spivak A.A. Jelektromagnitnye jeffekty pri relaksacionnyh processah v zemnoj kore neodnorodnogo stroenija // Doklady RAN. 2007. T. 417, № 6. S. 823-827].
 12. Baddari K., Frolov A.D., Tourtchine V., Makdeche S., Rahmoune F. Effect of temperature on the physical precursors of rock block failure., *Acta Geophysica*. 2012;(60)4:1007-1029.
 13. Baddari K., Frolov A.D., Tourtchine V., Rahmoune F. An integrated study of the dynamics of electromagnetic and acoustic regimes during failure of complex macrosystems using rock blocks., *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2011;(44)3:269-280.
 14. Catlos E.J., Jacob L., Baker C.B., Sorensen S.S., Çemen I., Linking microcracks and mineral zoning of detachment-exhumed granites to their tectonomagmatic history: evidence from the salihli and turgutlu plutons in western turkey (menderes massif). *Journal of Structural Geology*. 2011;(33)5:951-969.
 15. *Inspection and monitoring techniques for bridges and civil structures*. Ed. FU. Gongkang. Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2005, 270 p.