

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РОСТА ТРЕЩИН В ВЯЗКО-УПРУГОЙ СРЕДЕ С РАЗВИТОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

© 2017

В.А. Калачев, студент-магистрант Института естественных наук и математики

П.Е. Панфилов, доктор физико-математических наук, профессор,

старший научный сотрудник Института естественных наук и математики

Д.В. Зайцев, доктор физико-математических наук, доцент Института естественных наук и математики
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург (Россия)

Ключевые слова: горные породы; малогабаритные образцы; диаметрально сжатие; механические свойства; трещины; эффект Ребиндера.

Аннотация: Изучение физических механизмов разрушения горных пород позволяет получать информацию, необходимую при разработке новых технологий добычи и переработки полезных ископаемых. Также такие знания дают возможность оценить влияние внешних факторов, например воды, на прочностные характеристики горных выработок и сооружений, в том числе и подземных, в реальных условиях. В работе изучается деформационное поведение и особенности разрушения малогабаритных образцов, вырезанных из модельных вязко-упругих материалов – горных пород (углистого кварцита, серпентинита и искусственного песчаника) при диаметрально сжатии – непрямом растяжении. Лабораторные исследования и последующее моделирование структуры и свойств горных пород, выполненные на малогабаритных образцах, дают возможность решить поставленную задачу, не привлекая дорогостоящее испытательное оборудование и не нарушая целостности образцов. В ходе исследования были изготовлены малогабаритные образцы в форме цилиндров из модельных вязко-упругих материалов. Оценены механические свойства образцов углистого кварцита, серпентинита и искусственного песчаника в исходном состоянии и после суточной выдержки в воде. Показано влияние воды на изменение типа деформационного поведения образцов. Выполнено картирование боковых поверхностей образцов, и составлены топограммы рабочих поверхностей до и после испытаний. На их базе проведен металлографический анализ геометрических характеристик трещин на макро- и микроскопическом уровне. Выдвинуто предположение, что изменение типа деформационного поведения горных пород, а также снижение прочностных свойств исследуемых образцов горных пород под влиянием воды объясняется механизмами эффекта Ребиндера.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что жидкая среда может кардинально изменить характер деформационного поведения твердого тела [1; 2]. Например, под влиянием воды происходит снижение прочностных свойств горных пород, что используется в горном деле [3–5]. По экспериментальным данным работы [6] при деформировании «сухих» образцов гранита разрушение развивается по двухстадийному механизму: дисперсное накопление дефектов, локализация и развитие, как правило, единственного очага, а для водонасыщенных наблюдается хаотичное разрушение во всем объеме образца и высокая поврежденность материала. Прочностные свойства водонасыщенных образцов, по сравнению с «сухими», были снижены в 1,5–2 раза. Также хорошо известны технологии разрыхления прочных горных пород при помощи специальных эмульсий, когда в шурфы вместе со взрывчаткой закачиваются жидкие поверхностно активные вещества [7–9]. При этом важно иметь достоверную информацию о механических характеристиках и механизмах релаксации напряжений в материале при таких условиях [10–12]. Главный вопрос заключается в том, каким образом жидкость влияет на развитие трещин в лабораторных образцах под действием механической нагрузки. Данный вопрос оказался недостаточно изученным [13; 14]. Возможно, основной причиной этого является невозможность провести испытание и микроскопию трещин в процессе нагружения на одном образце. Применение же малогабаритных лабораторных образцов (линейные размеры порядка нескольких миллиметров) позволит проводить механические испыта-

ния и металлографическую аттестацию горных пород на одних и тех же образцах, не нарушая их целостности [15–17].

Полученные результаты показывают, что использование малогабаритных лабораторных образцов позволяет получать детальную информацию о деформационном поведении горных пород без привлечения дорогостоящей крупногабаритной испытательной техники и проводить исследования структуры образцов, не нарушая их целостности [18–20].

Цель работы – исследование влияния присутствия воды в породе на изменение механических свойств и характер развития трещин в условиях диаметрально сжатия (непрямого растяжения) малогабаритных образцов углистого кварцита, серпентинита и искусственного песчаника.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве модельных материалов были выбраны следующие горные породы: углистый кварцит, серпентинит и искусственный песчаник. Образцы из кварцита и серпентинита изготавливали в форме таблеток диаметром 6 мм и толщиной 3 мм, а из песчаника – диаметром 10 мм и толщиной 5 мм. Заготовки для образцов высверливали полым алмазным сверлом из плоскопараллельных пластин толщиной около 10 мм при водном орошении. Далее цилиндрические заготовки разрезали на таблетки при помощи малогабаритной алмазной пилы под водным орошением. Рабочие поверхности образцов шлифовывали до плоскопараллельного состояния на заточном алмазном диске с водной смазкой.

Механические испытания по схеме диаметального сжатия (непрямого растяжения, бразильского теста) проводили на разрывной машине Shimadzu AG-50K XD (скорость перемещения траверсы 0,1 мм/мин) на воздухе. Нагружение образца останавливали после появления на деформационной кривой резкого изгиба, означающего зарождение опасной трещины. Для каждого модельного материала было испытано две группы образцов по десять штук в каждой. Первая группа состояла из образцов, выдержанных в водопроводной воде в течение суток, тогда как образцы второй, контрольной, не подвергались вымачиванию. Каждый из вымоченных образцов извлекался из воды непосредственно перед испытанием на разрывной машине, не успевая высохнуть после суточной выдержки. Результаты испытаний обрабатывали при помощи пакета программ Trapezium компании Shimadzu.

Рабочие поверхности образцов до и после испытаний исследовали с помощью оптического сканера высокого разрешения Epson Perfection V750 Pro (увеличение $\times 10$) и металлографического микроскопа МИМ-8М, оснащенного цифровой камерой высокого разрешения Canon D60 (увеличение $\times 100$). Из полученных на микроскопе изображений составляли топограммы рабочих поверхностей образцов. По топограммам определяли форму, длину и ширину трещин, а также их количество. Результаты измерений обрабатывали при помощи стандартной процедуры обработки данных. В качестве статистических характеристик были выбраны среднеарифметическое значение и стандартное отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Для каждого образца были построены кривые «деформация – напряжение». В качестве примера на рис. 1 показаны деформационные кривые образцов из песчаника. Представлена лишь часть кривых, поскольку этого достаточно, чтобы показать степень разброса значений механических свойств исследуемых образцов. Характер же хода кривых был одинаков для всех горных пород, независимо от того, выдерживали материал в воде или нет. Во всех случаях деформация, которую выдерживали образцы до начала разрушения, составляла порядка или менее 1 %. Можно сделать заключение, что под действием растягивающей нагрузки образцы вели себя как хрупкий материал, независимо от того, были ли они выдержаны в воде или нет. Различие было лишь в таких количественных характеристиках, как предел прочности и деформация до разрушения. Данные по механическим свойствам изученных горных пород приведены в таблице 1. Видно, что прочностные свойства модельных горных пород снизились после суточной выдержки в воде.

Испытания показали, что «сухие» образцы кварцита распадаются на части под нагрузкой, тогда как образцы серпентинита и песчаника, которые также не вымачивались, сохраняют целостность при нагружении. Это указывает на то, что при приложении растягивающей нагрузки в материале действуют два конкурирующих механизма релаксации напряжений: зарождение – рост трещины и деформация (обратимая и необратимая).

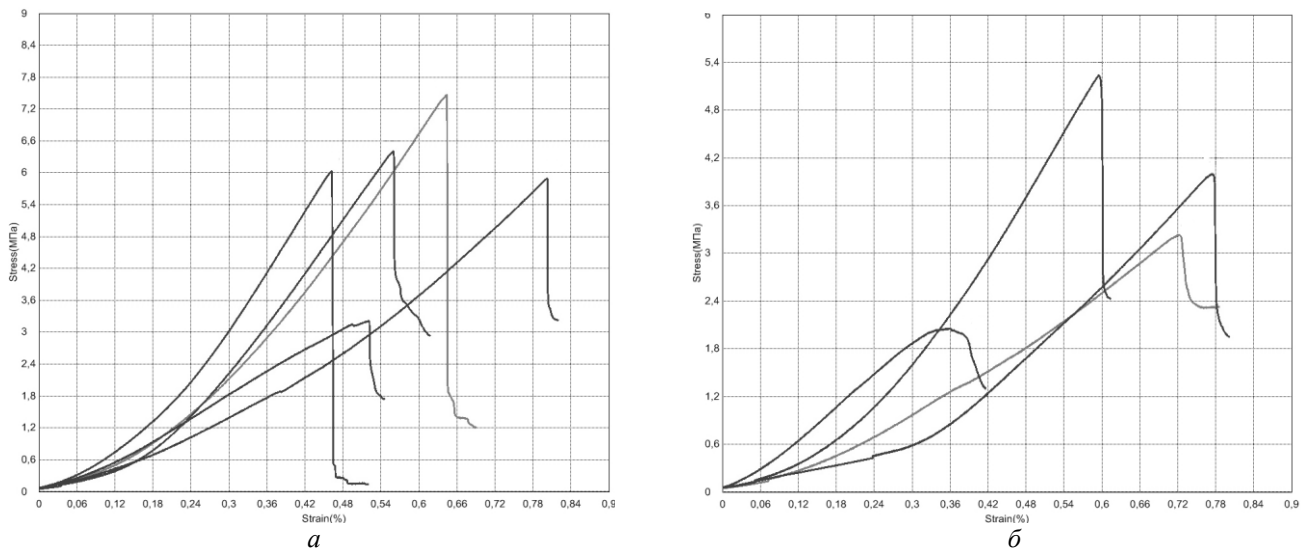


Рис. 1. Деформационные кривые исходных (а) и вымоченных в воде (б) образцов песчаника при диаметральном сжатии

Таблица 1. Механические свойства модельных материалов

Параметр	Углистый кварцит		Серпентинит		Искусственный песчаник	
	воздух	вода	воздух	вода	воздух	вода
σ_B , МПа	32±10	25±12	23±5	18±3	6±2	4±1
δ , %	1,3±0,3	0,9±0,2	1,3±0,3	0,9±0,0	0,6±0,1	0,6±0,2

Как и все горные породы, серпентинит не способен к макроскопической необратимой деформации, поэтому конкурирующим с разрушением механизмом будет обратимая (упругая) деформация. Из-за высокой пористости песчаника нельзя игнорировать вклад необратимой деформации в релаксацию приложенных напряжений, поскольку при нагружении часть пор может схлопываться. В кварците же основным механизмом релаксации напряжений является растрескивание, тогда как вклад деформации можно считать незначительным.

Несмотря на снижение предела прочности и деформации до разрушения образцов после выдержки в воде, образцы кварцита распались на части только в 50 % случаях, в то время как образцы серпентинита и песчаника сохраняли свою целостность. Это означает, что в серпентините и песчанике продолжают действовать оба механизма релаксации напряжений – растрескивание и деформация, тогда как в кварците с зарождением и развитием трещин начинает конкурировать деформация.

На рис. 2 и рис. 3 представлено растрескивание на макро- и микроуровне исходных и выдержанных в воде образцов песчаника и серпентинита. Исследование трещин на рабочей поверхности образцов показало, что

их вершины были острыми, независимо от того, из какого материала были вырезаны образцы, а траектории трещин располагались вдоль оси приложения нагрузки. В таблице 2 приведены параметры растрескивания исходных и выдержанных в воде образцов модельных материалов при диаметральном сжатии. Образцы были условно разделены на три участка, на каждом из которых подсчитывалась длина и ширина образовавшихся трещин. Из данных таблицы 2 видно, что длина магистральной трещины зависела от того, подвергался образец вымачиванию или нет. В «сухих» образцах она сравнима с диаметром, а в выдержанных в воде была меньше. При изучении трещин на микроскопическом уровне было обнаружено, что магистральная трещина состоит из нескольких линзообразных мелких трещин, имеющих тенденцию к слиянию (см. рис. 2 и рис. 3). Следует отметить, что угол раскрытия большинства трещин был 10–15°, но встречались и трещины, вершины которых имели значительно меньший угол раскрытия. Ширина же трещин в «сухих» образцах была в два-три раза больше, чем в выдержанных в воде (см. таблицу 2). Если на пути магистральной трещины встречалось включение, то это могло приводить к отклонению трещины от исходной траектории.

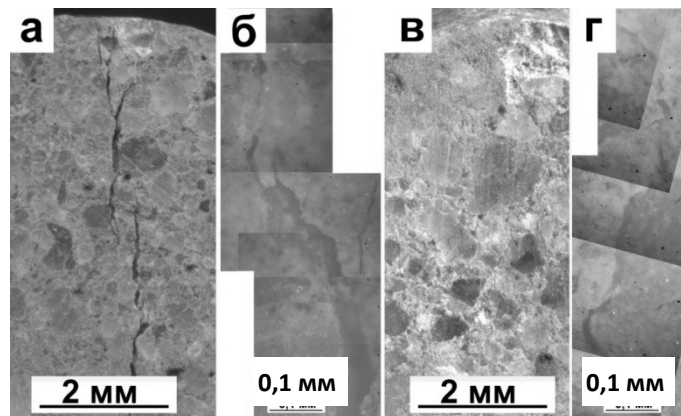


Рис. 2. Разрушение исходного (а, б) и выдержанного в воде (в, г) искусственного песчаника на макроуровне (а, в) и на микроуровне (б, г)

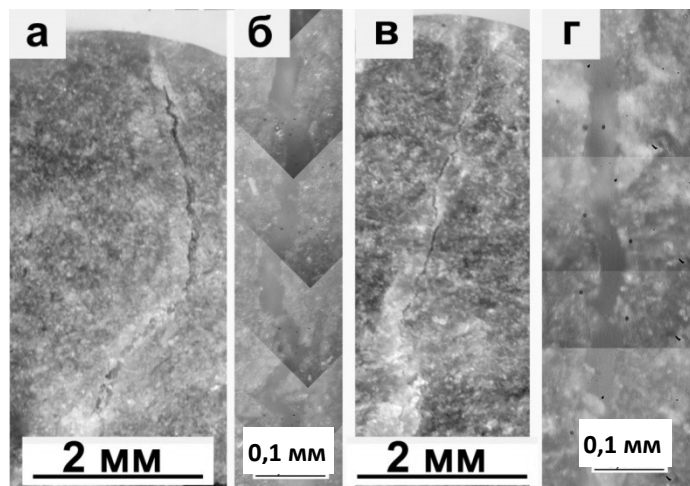


Рис. 3. Разрушение исходного (а, б) и выдержанного в воде (в, г) серпентинита на макроуровне (а, в) и на микроуровне (б, г)

Таблица 2. Растрескивание модельных материалов

Параметр образца		Углистый кварцит		Серпентинит		Искусственный песчаник	
		вода		воздух	вода	воздух	вода
Диаметр образца, мм		6	6	6	6	10	10
Общая длина магистральной трещины, мм		3,98±0,12	4,18±0,04	3,86±0,16	3,42±0,07	8,20±0,24	7,21±0,07
Количество трещин, шт		2	6	3	4	3	14
Длина трещин в отдельной части образца, мм	Левый край	2,09±0,01	0,30±0,03	1,92±0,07	0,48±0,03	2,17±0,15	0,56±0,04
	Центр	–	1,72±0,04	0,88±0,24	1,79±0,08	5,33±0,27	0,07±0,02
	Правый край	1,89±0,15	0,16±0,01	0,43±0,09	0,13±0,04	0,70±0,08	1,17±0,09
Ширина трещин в отдельной части образца, мм	Левый край	0,03±0,02	0,01±0,00	0,04±0,01	0,03±0,01	0,04±0,04	0,02±0,01
	Центр	–	0,01±0,00	0,03±0,01	0,04±0,01	0,10±0,04	0,01±0,00
	Правый край	0,03±0,01	0,01±0,00	0,03±0,01	0,02±0,01	0,02±0,01	0,02±0,01

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ деформационного поведения образцов подтверждает, что независимо от происхождения горной породы при приложении растягивающей нагрузки она ведет себя как хрупкий материал. Присутствие в породе воды приводит к снижению прочностных свойств образцов, но не меняет типа деформационного поведения. Данные по трещинам на макроскопическом уровне согласуются с заключением о хрупком характере их разрушения: у магистральных трещин острые вершины и прямолинейный профиль. Анализ разрушения на микроскопическом уровне показал, что магистральная трещина возникает в результате слияния нескольких линзообразных трещин, часть которых имеет затупленные вершины, а их ширина зависит от наличия воды в породе. Этот факт указывает на то, что магистральная трещина в действительности не является хрупкой. Описанный характер разрушения указывает на существование в образцах двух механизмов релаксации упругой энергии: роста трещин и упругой деформации. Поэтому механизм деформации изученных образцов на микроуровне можно охарактеризовать как вязко-упругий. Снижение предела прочности и деформации до разрушения, а также уменьшение ширины трещин под действием воды связано с уменьшением удельной свободной поверхностной энергии образцов вследствие физической адсорбции молекул жидкости на возникающих свежих поверхностях подрастающих трещин (поверхностно-активное действие жидкости), что является проявлением эффекта Ребиндера [1; 2].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Показано, что на макроскопическом уровне образцы изученных горных пород при приложении растягивающей нагрузки демонстрируют хрупкое поведение, а на микроскопическом уровне – вязко-упругое. Влияние воды на деформационное поведение образцов может быть объяснено эффектом Ребиндера. Механизм влияния жидкости на особенности роста трещин на макро- и микроскопическом уровне требует дальнейшего изучения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 15-19-10007. Авторы благодарят Алексея Николаевича Кочанова (ИПКОН РАН, Москва) и Юрия Аршавиновича Костандова (Крымский

федеральный университет, Симферополь) за обсуждение результатов.

Статья подготовлена по материалам докладов участников VIII Международной школы «Физическое материаловедение» с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 3–12 сентября 2017 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евсеев В.Д. Природа эффекта Ребиндера при разрушении горных пород // Нефтяное хозяйство. 2011. № 11. С. 38–40.
2. Евсеев В.Д. О возможности использования эффекта Ребиндера при бурении скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2010. Т. 317. № 1. С. 165–169.
3. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). М.: ИНЭК, 2005. 252 с.
4. Протосеня А.Г. Предельное состояние насыщенных горных пород и прогноз устойчивости добывающих скважин // Нефтяное хозяйство. 2015. № 2. С. 23–27.
5. Долгий И.Е., Николаев Н.И. Сопротивление горных пород разрушению при бурении скважин // Записки горного института. 2016. Т. 221. С. 655–660.
6. Куксенко В.С., Дамаскинская Е.Е., Кадомцев А.Г. Характер разрушения гранита при различных условиях деформирования // Физика Земли. 2011. № 10. С. 25–31.
7. Гоголин В.А. Деформационные и прочностные характеристики хрупких горных пород при сжатии // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 3. С. 3–8.
8. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб.: Наука, 2001. 343 с.
9. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (Физика горных пород). М.: Нефть и газ, 2004. 368 с.
10. Anders M.H., Laubach S.E., Scholz C.H. Microfractures: A review // Journal of Structural Geology. 2014. Vol. 69. Part B. P. 377–394.
11. Briševac Z., Kujundžić T. Models to estimate Brazilian indirect tensile strength of limestone in saturated state // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2016. P. 59–67. DOI: 10.17794/rgn.2016.2.5.

12. Ron H. Vernon: A practical guide to Rock Microstructure. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 579 p.
13. Макклиток Ф., Аргон А.С. Деформация и разрушение материалов. М.: ЕЭ Медиа, 2012. 501 с.
14. Argon A.S. Strengthening mechanisms in crystal plasticity. Oxford: Oxford University press, 2008. 425 p.
15. Briševac Z., Kujundžić T., Čajić S. Current Cognition of Rock Tensile Strength Testing By Brazilian Test // The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin. 2015. P. 101–111. DOI: 10.17794/rgn.2015.2.2.
16. Silberschmidt V.G., Silberschmidt V.V. Analysis of Cracking in Rock Salt // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2000. Vol. 33. № 1. P. 53–70.
17. Briševac Z., Kujundžić T. Models to estimate the Brazilian indirect tensile strength of limestone in saturated state // The Mining-Geology Petroleum Engineering Bulletin. 2016. P. 59–67.
18. Зайцев Д.В., Кочанов А.Н., Пантелеев И.А., Панфилов П.Е. О влиянии масштабного фактора при испытаниях на прочность образцов горных пород // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81. № 3. С. 366–369.
19. Зайцев Д.В., Кочанов А.Н., Токтогулов Ш.Ж., Пантелеев И.А., Панфилов П.Е. Влияние масштабного эффекта и неоднородности горных пород при определении их прочностных свойств // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. С. 208–215.
20. Сухонос С.И. Масштабный эффект – неразгаданная угроза. М.: Новый Центр, 2001. 68 с.
21. Evseev V.D. The nature of the Rehbinder's effect at rocks destruction. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2011, no. 11, pp. 38–40.
22. Evseev V.D. On the possibility of using the Rehbinder effect when drilling wells. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 165–169.
23. Adushkin V.V., Turuntaev S.B. *Tekhnogennyye protsessy v zemnoy kore (opasnosti i katastrofy)* [Technogenic processes in the Earth's crust (dangers and catastrophes)]. Moscow, INEK Publ., 2005. 252 p.
24. Protosenya A.G. Limit state of fluid saturated rocks and stability assessment of oil and gas boreholes. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2015, no. 2, pp. 23–27.
25. Dolgy I.E., Nikolaev N.I. Resistance of rocks to crushing during well drilling. *Zapiski gornogo instituta*, 2016, vol. 221, pp. 655–660.
26. Kuksenko V.S., Damaskinskaya E.E., Kadomtsev A.G. Fracture of granite under various strain conditions. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2011, vol. 47, no. 10, pp. 879–885.
27. Gogolin V.A. Deformation and strength characteristics brittle rock under compression. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 3, pp. 3–8.
28. Stavrogin A.N., Tarasov B.G. *Ekspperimentalnaya fizika i mekhanika gornyykh porod* [Experimental physics and mechanics of rocks]. Sankt Petersburg, Nauka Publ., 2001. 343 p.
29. Dobrynin V.M., Vendelshteyn B.Yu., Kozhevnikov D.A. *Petrofizika (Fizika gornyykh porod)* [Petrophysics (Physics of Rocks)]. Moscow, Neft i gaz Publ., 2004. 368 p.
30. Anders M.H., Laubach S.E., Scholz C.H. Microfractures: A review. *Journal of Structural Geology*, 2014, vol. 69, part B, pp. 377–394.
31. Briševac Z., Kujundžić T. Models to estimate Brazilian indirect tensile strength of limestone in saturated state. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 2016, pp. 59–67. DOI: 10.17794/rgn.2016.2.5.
32. Ron H. Vernon: A practical guide to Rock Microstructure. Cambridge, Cambridge University Press, 2004. 579 p.
33. McClintock F., Argon A.S. *Deformatsiya i razrushenie materialov* [Mechanical behavior of materials]. Moscow, EE Media Publ., 2012. 501 p.
34. Argon A.S. *Strengthening mechanisms in crystal plasticity*. Oxford, Oxford University press, 2008. 425 p.
35. Briševac Z., Kujundžić T., Čajić S. Current Cognition of Rock Tensile Strength Testing By Brazilian Test. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, 2015, pp. 101–111. DOI: 10.17794/rgn.2015.2.2.
36. Silberschmidt V.G., Silberschmidt V.V. Analysis of Cracking in Rock Salt. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2000, vol. 33, no. 1, pp. 53–70.
37. Briševac Z., Kujundžić T. Models to estimate the Brazilian indirect tensile strength of limestone in saturated state. *The Mining-Geology Petroleum Engineering Bulletin*, 2016, pp. 59–67.
38. Zaytsev D.V., Panfilov P.Y., Kochanov A.N., Panteleev I.A. Influence of the scale effect in testing the strength of rock samples. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2017, vol. 81, no. 3, pp. 337–340.
39. Zaytsev D.V., Kochanov A.N., Toktogulov Sh.Zh., Panteleev I.A., Panfilov P.E. Influence of scale effect and heterogeneity of rocks to determine their strength. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy bulletin*, 2016, no. 11, pp. 208–215.
40. Sukhonos S.I. *Masshtabniy effekt – nerazgadannaya ugroza* [Scale effect – unsolved threat]. Moscow, Noviy Tsentr Publ., 2001. 68 p.

REFERENCES

**REGARDING THE SPECIAL ASPECTS OF CRACKS GROWTH IN A VISCO-ELASTIC MATERIAL
WITH THE EXTENDED HIERARCHIC STRUCTURE**

© 2017

V.A. Kalachev, graduate student of Institute of Natural Sciences and Mathematics

P.E. Panfilov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor,
senior researcher of Institute of Natural Sciences and Mathematics

D.V. Zaytsev, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics),
assistant professor of Institute of Natural Sciences and Mathematics

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg (Russia)

Keywords: rock materials; small-size specimens; diametral compression; mechanical properties; cracks; Reh binder effect.

Abstract: The study of physical mechanisms of rock materials destruction allows obtaining the information necessary for the development of new technologies for mining and processing of minerals. Furthermore, such knowledge makes it possible to assess in real-life conditions the influence of external factors, for example, water, on the strength characteristics of mine workings and constructions, including the underground ones. The authors study the deformation behavior and special aspects of the destruction of small-sized specimens cut from the model viscoelastic materials – rock materials (carbonaceous quartzite, serpentinite, and artificial sandstone) under the diametrical compression – indirect stretching. Laboratory studies and subsequent modeling of the structure and properties of rock materials performed on small-sized specimens make it possible to solve the task not attracting the expensive test equipment and without violating the integrity of the specimens. During the study, small-sized specimens in the form of cylinders were produced from model viscoelastic materials. The mechanical properties of carbonaceous quartzite, serpentinite, and artificial sandstone specimens were estimated in the initial state and after a 24-hour water soak test. The study showed the influence of water on the change of a type of the specimens' deformation behavior. The authors mapped the specimens' side surfaces and created the topograms of the working surfaces before and after the tests. Based on them, the metallographic analysis of the geometric characteristics of cracks was performed at the macro- and microscopic levels. It was suggested that the change of a type of deformation behavior of rock materials, as well as the decrease in the strength properties of test rock materials specimens under the influence of water, are explained by the Reh binder effect mechanisms.