

В заключение хотелось бы отметить, что для мониторинга горно-капитальных сооружений возможно комплексировать измерения DSS дополнительными измерениями DTS и DAS, что позволит получать дополнительную информацию об объекте мониторинга. Например, возможно использовать систему распределенного измерения для мониторинга деформации в шахтных стволах, при комплексировании DSS системой DAS возможно получать информацию о деформации и акустической эмиссии в структуре бетона, а также при помощи DTS получать информацию о температурном расширении материала.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 121111800053-1).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРпт, 2005. – 208 с.: ил.
2. Matta F., Bastianini F., Galati N., Casadei P., Nanni A. Distributed strain measurement in steel bridge with Fiber optic sensors: Validation through diagnostic load test // Journal of Performance of Constructed Facilities. – 2008. – V. 22, № 4. – P. 264-273.
3. Minardo A., Bernini R., Amato L., Zeni L. Bridge monitoring using brillouin fiber-optic sensors // IEEE Sensors journal. – 2012. – V. 12, № 1. – P. 145-150.
4. Regier R., Hoult N.A. Distributed strain behavior of a reinforced concrete bridge: Case Study // Journal of Bridge Engineering. – 2014. V. 19, № 12. – номер статьи 05014007.
5. Moser F., Lienhart W., Woschitz H., Schuller H. Long-term monitoring of reinforced earth structures using distributed fiberoptic sensing // Journal of Civil Structural Health Monitoring. – 2016. – V. 6, № 3. – P. 321-327.
6. Feng X., Han Y., Wang Z., Liu H. Structural performance monitoring of buried pipelines using distributed fiber optic sensors // Journal of Civil Structural Health Monitoring. – 2018. – V. 8, № 3. – P 509-516.
7. Buchmayer F., Monsberger C.M., Lienhart W. Advantages of tunnel monitoring using distributed fibre optic sensing // Journal of Applied Geodesy. – 2021. – V. 15, № 1. – номер статьи 0065. – DOI: 10.1515/jag-2019-0065.
8. Billon A., Hénault J.M., Quiertant M., Taillade F., Khadour A., Martin R.P., Benzarti K. Qualification of a distributed optical fiber sensor bonded to the surface of a concrete structure: A methodology to obtain quantitative strain measurements // Smart Materials and Structures. – 2015. – V. 24, № 11. – номер статьи 115001.
9. Fischer O., Thoma S., Crepez S. Distributed fiber optic sensing for crack detection in concrete structures // Beton-und Stahlbetonbau. – 2019. – V. 114, № 3. – P. 150-159. – DOI: 10.1002/best.201800089.

УДК 622.02+622.2

DOI:10.7242/echo.2022.2.9

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПРИ СДВИГЕ СКАЛЬНЫХ ПОРОД ПО ТРЕЩИНАМ

В.С. Кузьминых

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Проведены испытания образцов скальных пород месторождения Саяк IV (республика Казахстан) в режиме сдвиг со сжатием по трещинам. Испытания проводились по многоступенчатой схеме нагружения на сдвиговой сервогидравлической испытательной установке MTS 816 при вертикальных нагрузках – 0,5, 1,0 и 2,0 МПа. По результатам испытаний получены сдвиговые паспорта прочности, а также зависимости изменения жесткости сдвига по трещине от величины нормального напряжения.

**Ключевые слова:** скальная порода, трещина, сдвиговой паспорт прочности, жесткость сдвига.

В настоящее время достаточно актуальными являются исследования по изучению прочностных и деформационных свойств на сдвиг по трещинам скальных горных пород. Интерес к данным механическим характеристикам базируется на мнении [1], что поведение скального массива в значительной степени определяется смещениями по трещинам, разделяющим блоки ненарушенных горных пород.

Изначально одним из наиболее сложных вопросов изучения механических свойств при смещении по трещинам являлось определение их сдвиговых деформационных характеристик [2]. Наиболее часто для изучения сдвиговых свойств применялись объемные испытания по схеме Кармана, а также испытания на сдвиг в «косых» матрицах, позволяющие получать только прочностные сдвиговые показатели. С появлением высокоточного сдвигового оборудования, позволяющего осуществлять прямые испытания в режиме сдвиг со сжатием по трещине, представилась возможность изучения деформационных сдвиговых характеристик, в том числе влияния на них фактора нормального напряжения.

Для изучения влияния нормального напряжения на деформационные и прочностные свойства при сдвиге по трещинам проведена серия экспериментов на образцах скальных пород месторождения Саяк IV (республика Казахстан). Исследование проводилось в режиме многоступенчатого нагружения по схеме «сдвиг со сжатием» на сервогидравлической испытательной установке MTS-816 с учетом требований стандарта по определению прочности на сдвиг [3]. Технические характеристики испытательной установки: вертикальное усилие в режиме сжатия – 513 кН; максимальное сдвиговое усилие – 254 кН. Контроль горизонтальных смещений осуществлялся с помощью двух индуктивных датчиков перемещения LVDT с точностью измерения 0,001 мм. Вертикальные смещения (дилатансия) контролировались четырьмя аналогичными датчиками. Одним из достоинств испытательных комплексов MTS является поставляемое в комплекте с оборудованием универсальное программное обеспечение Multi Purpose Test Ware (МРТ), позволяющее изменять условия эксперимента в достаточно широком диапазоне. Результаты эксперимента фиксировались в автоматическом режиме в память персонального компьютера.

Испытания проводились на образцах керна, включающих трещину. Размер керна составлял: диаметр – 62÷63 мм, длина – 80÷90 мм. Перед испытаниями с целью оптимального размещения в сдвиговых матрицах края керна подрезались (рис. 1). Образцы в матрицах фиксировались с помощью высокопрочного гипса и располагались таким образом, чтобы сдвиг происходил по трещине.



Рис. 1. Внешний вид образцов с трещинами: а – алевролит; б – диорит; в – песчаник

Подготовленный в матрицах образец фиксировался в нижней обойме сдвиговой испытательной установки MTS-816. Далее производилась установка верхней обоймы. Собранные обоймы помещались в сдвиговую испытательную ячейку (рис. 2а).

Перед началом эксперимента задавались необходимые параметры испытаний с помощью программы МРТ: величина нормальной нагрузки, скорость сдвига, максимальное сдвиговое смещение и т. д.



Рис. 2. Подготовка образца к испытанию в сдвиговой установке MTS-816 (а), поверхность трещины скальных пород после испытания на сдвиг (б)

Испытания на сдвиг проводились в режиме заданных сдвиговых смещений при скорости 1 мм/мин. Испытание каждого образца проводились при трех уровнях нормальной нагрузки ( $\sigma$ ): 0,5 МПа; 1,0 МПа; 2,0 МПа. На рис. 2б показан вид разрушенного образца по трещине после эксперимента.

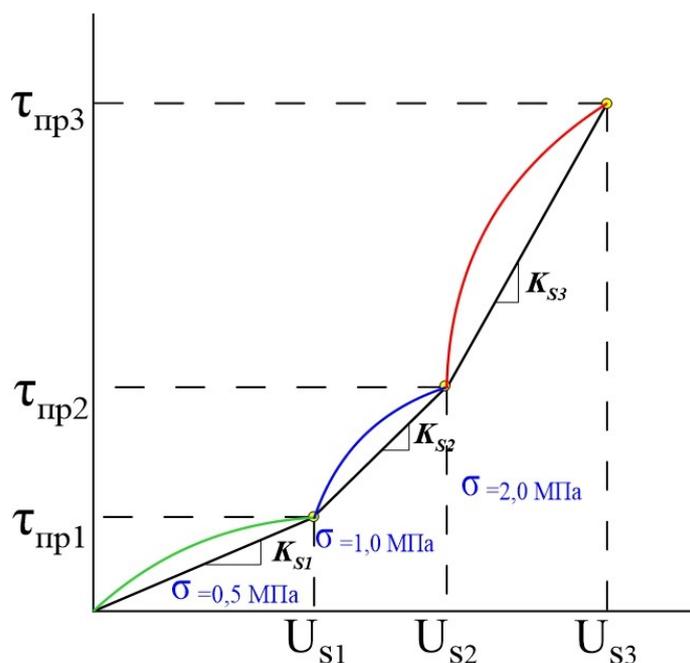


Рис. 3. Схема определения сдвиговой жесткости по трещине при многоступенчатой схеме нагружения

По результатам испытаний определялась жесткость сдвига по трещине ( $K_s$ ) для каждого уровня нормальной нагрузки по схеме, приведенной на рис. 3, по формулам:

$$K_{s1} = \frac{\tau_{np1}}{U_{s1}}, \quad (1)$$

$$K_{s2} = \frac{\tau_{np2} - \tau_{np1}}{U_{s2} - U_{s1}}, \quad (2)$$

$$K_{s3} = \frac{\tau_{np3} - \tau_{np2}}{U_{s3} - U_{s2}}. \quad (3)$$

На рис. 4 приведены зависимости изменения сдвиговой жесткости от величины нормального напряжения, описываемые выражением:

$$K_s = K_{s0} \cdot e^{a\sigma}, \quad (4)$$

где  $K_{s0}$  – начальная жесткость сдвига,  $a$  – эмпирический показатель.

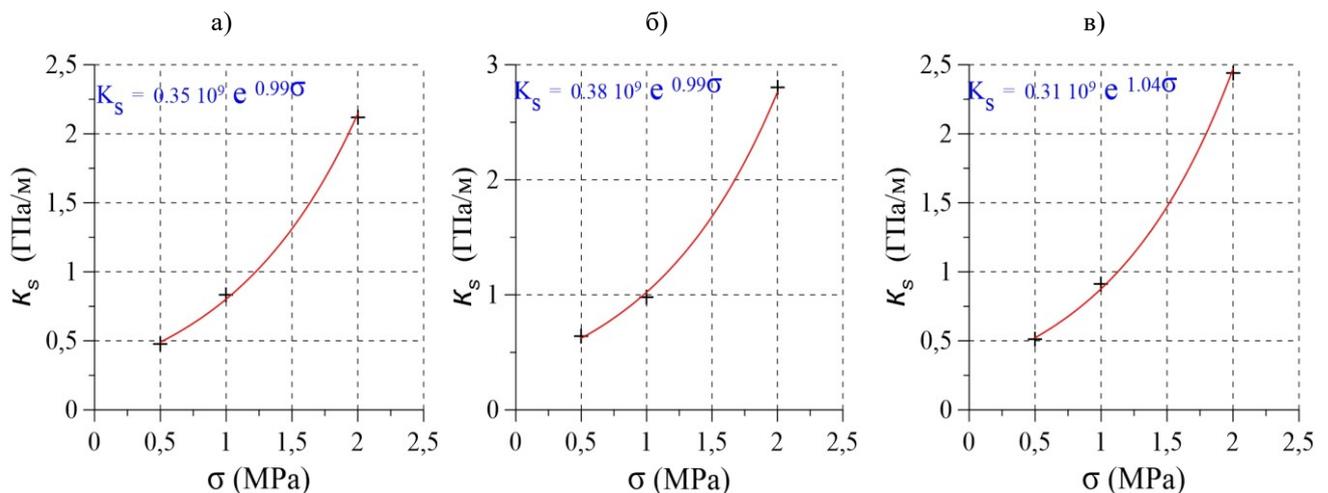


Рис. 4. Зависимости влияния нормального напряжения на жесткость сдвига:

а – алевролит; б – диорит; в – песчаник

По результатам определения прочностных параметров алевролита, диорита и песчаника были построены сдвиговые паспорта прочности (зависимость предельного напряжения сдвига от соответствующего нормального напряжения), рис. 5. В связи с тем, что при проведении данного комплекса сдвиговых испытаний рассчитанные значения предельных нормальных напряжений ( $\sigma$ ) изменяются в достаточно узком интервале, не превышающем 2 МПа, в качестве вида аппроксимирующей паспортной зависимости была выбрана линейная функция вида:

$$\tau = k_{str} \cdot \sigma, \quad (5)$$

где  $k_{str}$  – коэффициент трения (предельный).

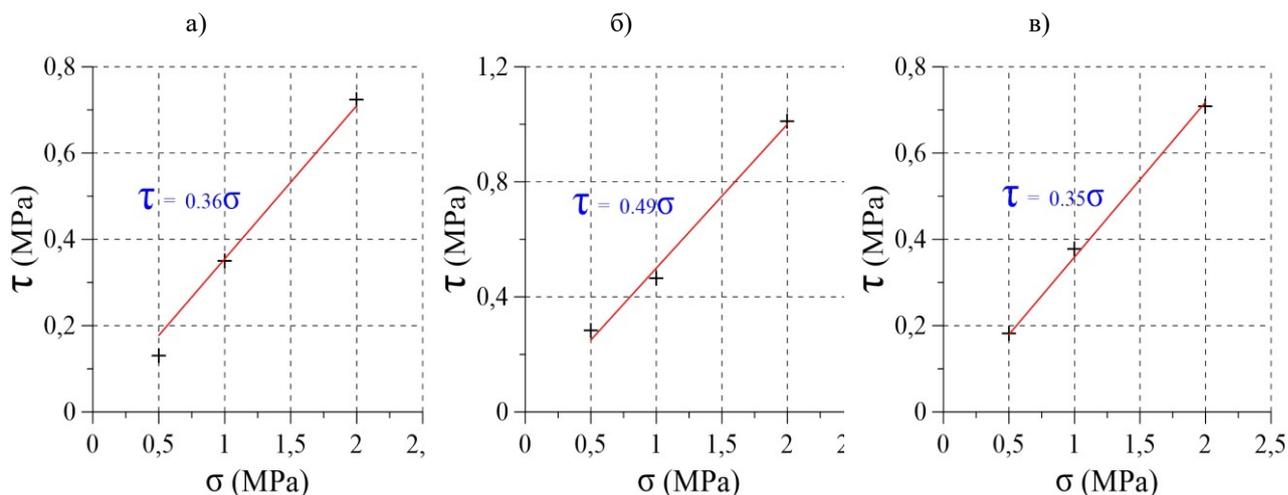


Рис. 5. Паспорта прочности скальных пород при сдвиге по трещине:  
а – алевролит; б – диорит; в – песчаник

Результаты изучения механических характеристик при сдвиге скальных пород по трещине сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения прочностных и деформационных характеристик скальных пород при сдвиге по трещине

п/п №	Порода	Кол-во обр.	Механические показатели при сдвиге по трещине						Показатели аппроксимации		
			σ=0,5 МПа		σ=1,0 МПа		σ=2,0 МПа		$k_{str}$	$K_{So},$ ГПа/м	$a$
			τ, МПа	$K_S,$ ГПа/м	τ, МПа	$K_S,$ ГПа/м	τ, МПа	$K_S,$ ГПа/м			
1	Алевролит	7	0,13	0,48	0,35	0,83	0,72	2,12	0,36	0,35	0,99
2	Диорит	6	0,28	0,64	0,46	0,98	1,01	2,80	0,49	0,38	0,99
3	Песчаник	11	0,18	0,51	0,38	0,91	0,71	2,44	0,35	0,31	1,04

Анализ результатов проведенных исследований позволил установить параметры паспорта прочности горных пород 24 проб, испытанных в режиме сжатие со сдвигом при трехступенчатой схеме нагружения. Выявлен интервал изменения предельного сдвигающего напряжения образцов, составляющий: 0,13 ÷ 0,28 МПа ( $\sigma = 0,5$  МПа); 0,35 ÷ 0,46 МПа ( $\sigma = 1,0$  МПа); 0,71 ÷ 1,01 МПа ( $\sigma = 2,0$  МПа). Коэффициент трения (предельный) составил: для алевролитов – 0,36; диоритов – 0,49; песчаников – 0,35.

Определена сдвиговая жесткость, которая в интервале изменения нормальных напряжений от 0,5 МПа до 2,0 МПа составила: для алевролитов – 0,48÷2,12 ГПа/м;

диоритов –  $0,64 \div 2,80$  ГПа/м; песчаников –  $0,51 \div 2,44$  ГПа/м. Проведенный анализ изменения данного показателя от нормального напряжения выявил качественную и количественную сопоставимость полученных зависимостей для различных пород. Также установлена тенденция увеличения предельного коэффициента трения при возрастании начальной жесткости сдвига.

Дальнейшие исследования в рамках данной тематики планируется направить на изучение связи шероховатости поверхности трещины с дилатансионными и сдвиговыми механическими показателями.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от «29» декабря 2020 г. (рег. номер 122012000403-1), а также РФФИ и Пермского края по гранту №19-45-590004.*

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН и ЦКП «Центр изучения свойств геоматериалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Троллоп Д.Х., Бок Х., Бест Б.С., Уоллес К., Фултон М. Введение в механику скальных пород. – М.: Мир, 1983. – 276 с.: ил.
2. Евдокимов П.Д., Сапегин Д.Д. Прочность, сопротивляемость сдвигу и деформируемость оснований сооружений на скальных породах: Лабораторные и полевые эксперим. исследования. –М.; Л.: Энергия, 1964. – 172 с.: ил.
3. ISRM: Suggested Methods for Determining the Shear Strength. – 1974.

УДК 622.83

DOI:10.7242/echo.2022.2.10

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕНИЙ В НЕТРОНУТОМ МАССИВЕ АНГИДРИТ-ДОЛОМИТОВЫХ ПОРОД

В.Н. Токсаров, Н.Л. Бельтюков, А.А. Ударцев, И.А. Морозов, Д.А. Поспелов  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Приведены результаты экспериментальных исследований по измерению напряжений в нетронutom массиве ангидрит-доломитовых пород на руднике Гремячинского ГОК на глубине около 1100 м. Контроль напряжений осуществлялся методом, основанном на использовании акустоэмиссионных эффектов памяти нагружаемого околошпурового пространства [1, 2]. Экспериментами установлено, что максимальное горизонтальное напряжение в нетронutom массиве ориентировано субширотно ( $A_{m4} \approx 86^\circ$ ) и равно 30,8 МПа, минимальное горизонтальное напряжение ориентировано субмеридианально ( $A_{m5} \approx 176^\circ$ ) и равно 14,8 МПа. Величина измеренных вертикальных напряжений в нетронutom массиве составляет порядка 23,0 МПа.

**Ключевые слова:** скважинный гидродомкрат, эффект Кайзера, ангидрит-доломитовые породы, нетронутый массив, оценка напряжений, коэффициент бокового распора.

Гремячинское месторождение калийных солей находится в 150 км к юго-западу от г. Волгограда. На месторождении планируется разработка одного сильвинитового пласта с изменяемой мощностью  $2,5 \div 21,5$  м. Глубина расположения пласта составляет  $1100 \div 1300$  м.