

каменной соли – 1,5 м. В данной зоне обнаружены увеличенные значения RA-параметра по сравнению с условно нетронутым массивом, что позволяет сделать вывод о повышенной степени нарушенности пород. Полученные результаты говорят о том, что метод акустической эмиссии имеет высокие перспективы использования для оценки геомеханического состояния пород приконтурного соляного массива.

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., а также при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-45-590004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров А.Б. Практическая геомеханика: пособие для горных инженеров. – М.: Горная книга, 2006. – 391 с.: ил.
2. Морозов И.А. Оценка состояния приконтурных пород в условиях глубоких горизонтов калийных рудников // Горное эхо. – 2020. – № 2 (79). – С. 30-34. DOI: 10.7242/echo.2020.2.6.
3. Лавров А.В., Шкуратник В.Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51, № 5. – С. 6-18.
4. Lajtai E.Z., Duncan E.J.S. The mechanism of deformation and fracture in potash rock // Canadian Geotechnical Journal. – 1988. – V. 25, № 2. – P. 262-278. – DOI: 10.1139/t88-030.
5. Бельтюков Н.Л. О механизме проявления эффекта Кайзера в осадочных горных породах // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2015. – С. 102-104.
6. Бельтюков Н.Л., Гурко В.А. Особенности изменения акустоэмиссионных параметров при деформировании образцов соляных пород // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 122-125.
7. Бельтюков Н.Л. Исследование параметров акустической эмиссии при испытании соляных пород в режиме ползучести // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 131-134.
8. Бельтюков Н.Л. Исследование особенностей процесса разрушения соляных пород методом акустической эмиссии // Горное эхо. – 2020. – № 3 (80). – С. 33-38. – DOI: 10.7242/echo.2020.3.6.
9. Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 198 с.

УДК 622.02

DOI:10.7242/echo.2021.3.7

ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ОСЛАБЛЕННОГО СЛОЯ НА ПРОЧНОСТЬ СЛОИСТЫХ ОБРАЗЦОВ

А.А. Ударцев

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Приведены результаты физического моделирования несущей способности междукамерных целиков, проводимого на слоистых цементных образцах, изготовленных из цементно-песчаной смеси, в условиях одноосного сжатия. Результаты исследований показали, что для трехслойных образцов присутствует более выраженный характер отклонения экспериментальных данных от расчетной оценки влияния толщины слабого слоя на прочность по сравнению с двухслойными. По результатам проведенных исследований предложена модифицированная формула средней гармонической взвешенной для расчета эквивалентной прочности слоистых образцов.

Ключевые слова: цементно-песчаные слоистые образцы, ослабленный слой, одноосное сжатие, предел прочности, прочность.

Отработка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей осуществляется камерной системой разработки с оставлением поддерживающих междукамерных целиков. Безопасность и эффективность ведения горных работ в первую очередь зависит от правильного выбора размеров поддерживающих целиков, основанного на оценке их несущей способности, учитывающей влияние различных горно-геологических факторов, одним из которых является неоднородность строения. Оценка неоднородности строения осуществляется на основе определения агрегатной прочности, учитывающей в качестве основных влияющих факторов глинистые прослойки, а также эквивалентную (приведенную) прочность пород, слагающих междукамерные целики. Традиционно тот или иной показатель горных пород, сложенных из слоев с отличающимися физическими характеристиками, определяется с помощью различных выражений [1]. В действующих «Указаниях...» [2] для расчета эквивалентной прочности применяется формула средней гармонической взвешенной, имеющая следующий вид:

$$\sigma_0 = \frac{m}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\sigma_{ci}}}, \quad (1)$$

где m – расчетная высота междукамерного целика, m_i – мощность i – го слоя породы ($i = 1, 2 \dots n$), n – количество слоев разнопрочных пород, слагающих междукамерные целики в пределах их расчетной высоты m , σ_{ci} – расчетная прочность при сжатии стандартных образцов (с отношением высоты к ширине равном двум) i – го слоя породы.

Несмотря на достаточно длительную практику расчета эквивалентной прочности по формуле гармонического средневзвешенного с использованием экспериментальных данных прочности слоев, определенных в лабораторных условиях, достаточно актуальным остается вопрос проведения сопоставительных исследований при обосновании используемой зависимости.

Проведение модельных экспериментов по определению эквивалентной прочности на породных образцах, имеющих заданное слоистое строение и прочностные характеристики, представляет практически неразрешимую задачу, обусловленную достаточно высоким естественным разбросом свойств горных пород. В этой связи была разработана методика изготовления слоистых и однородных цементных образцов методом «сплошной заливки», позволяющая с помощью подбора соотношений компонентов цементно-песчаной смеси получать образцы различной прочности. Для изготовления блока использовалась цементно-песчаная смесь, состоявшая из просеянного песка 0,25-1,0 класса крупности и цемента марки ПЦ 400-Д20. Заливка блоков проводилась в разборной форме с внутренними размерами 400x300x100 мм и извлекаемыми пластиковыми вставками, позволяющими получать образцы со слоями различной высоты. Для выделения слоев в блоке использовались цветные красители. Для стабилизации прочностных показателей цементно-песчаный блок «выдерживался» в течение месяца. Подготовленный блок распиливался на прямоугольные образцы размером 100x50x50 мм с помощью дискового отрезного станка без применения промывочной жидкости. Всего было изготовлено два блока с двух и трехслойными слоистыми образцами, общее количество образцов составило 84 шт. Пример изготовленных блоков и нарезанных образцов приведен на рис. 1.

Лабораторные испытания проводились в режиме одноосного нагружения на электромеханическом прессе Zwick/Z250 (предельная нагрузка – 250 кН, жесткость –

$1,25 \cdot 10^8$ Н/м), позволяющем проводить испытания с заданной скоростью деформирования и с автоматической регистрацией результатов эксперимента. По результатам экспериментальных данных строились полные диаграммы деформирования, по которым определялся полный комплекс прочностных и деформационных показателей. Определение физико-механических свойств слоистых составных образцов осуществлялось в соответствии с действующими ГОСТами (ГОСТ 21153.2–84, 2001 [3], ГОСТ 28985-91, 2004 [4]). Осредненные результаты определения прочности на сжатие ($\sigma_{сж}$) по каждой серии, включающей образцы с одинаковым соотношением цемента и песка, а также слоями одинаковой толщины приведены в табл. 1. Также в таблице приведены результаты расчета прочности слоистых образцов по формуле гармонического средневзвешенного (1).

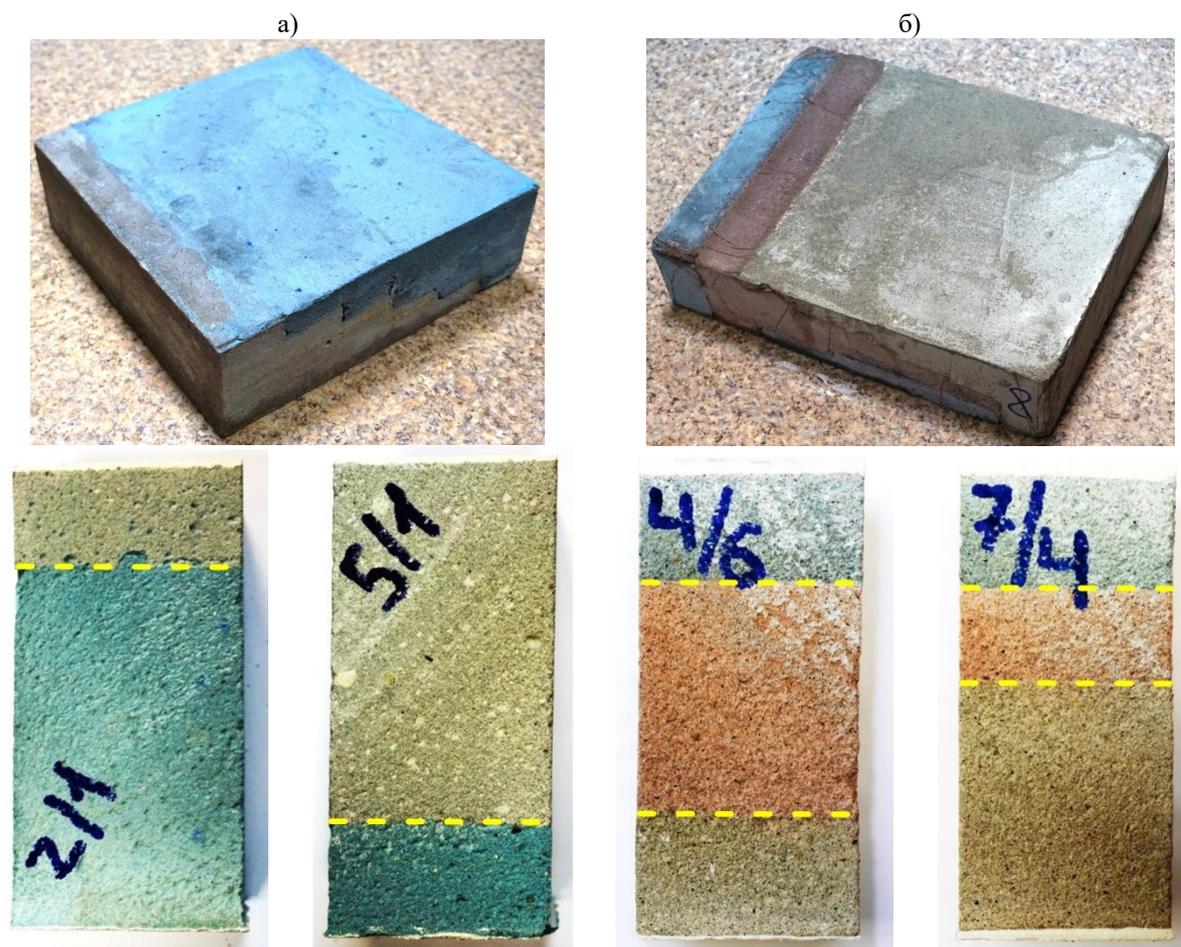


Рис. 1. Фотографии блоков и пример изготовленных образцов:
а) двухслойные образцы; б) трехслойные образцы
(желтой пунктирной линией показаны границы разнопрочных слоев)

При анализе полученных результатов наблюдается тенденция уменьшения прочности цементно-песчаных слоистых образцов с увеличением толщины слабого слоя для обоих блоков. Для двухслойного блока наиболее резкое снижение происходит на образцах с толщиной слабого слоя 20 мм, предел прочности падает почти на 30% относительно образцов без слабого слоя. Аналогичная ситуация наблюдается для трехслойного блока: при увеличении суммарной толщины слабых слоев происходит понижение предела прочности. Максимально интенсивное снижение происходит на образцах с

суммарной толщиной слабого слоя 45 мм, предел прочности уменьшается почти на 50% относительно образца без слабого слоя.

Таблица 1
Осредненные результаты экспериментальных значений прочности и расчетные значения гармонического средневзвешенного слоистых образцов

Блок	№ Пробы	Кол-во образцов, шт.	Кол-во слоев	Толщина первого слоя, мм (основной)	Толщина второго слоя, мм (слабый)	Толщина третьего слоя, мм (слабый)	$\sigma_{сж}$, МПа	σ_0 , МПа
Двухслойный	1	6	2	0	100	0	5,92	5,92
	2	6	2	25	75	0	7,04	6,99
	3	6	2	40	60	0	7,64	7,84
	4	6	2	60	40	0	9,10	9,36
	5	6	2	80	20	0	10,79	11,61
	6	6	2	100	0	0	15,28	15,28
Трехслойный	1	6	3	0	0	100	4,81	4,81
	2	6	3	0	100	0	2,30	2,3
	3	6	3	20	55	25	2,44	3,14
	4	6	3	25	50	25	2,67	3,29
	5	6	3	35	40	25	2,71	3,65
	6	6	3	45	30	25	3,35	4,10
	7	6	3	55	20	25	3,82	4,67
	8	6	3	100	0	0	7,31	7,31

Также по осредненным результатам экспериментальных и расчетных данных были построены зависимости влияния толщины слабого слоя на прочность слоистых образцов. Анализ полученных кривых показал, что экспериментальные значения предела прочности ниже расчетных как для двухслойных составных образцов, так и для трехслойных. Отсюда можно сделать вывод, что расчет эквивалентной прочности по формуле гармонического средневзвешенного дает значительные погрешности.

Для более точного описания экспериментальных данных по определению эквивалентной прочности предложено формулу средней гармонической взвешенной модифицировать путем введения величины равной прочности слоев, возведенных в степень k . Предложенная формула имеет вид:

$$\sigma_0 = \sqrt[k]{\left(\frac{m}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\sigma_{ci}^k}}\right)}, \quad (2)$$

где k – показатель степени, получаемый экспериментально.

Необходимо отметить, что формула гармонического средневзвешенного (1), применяемая для расчета эквивалентной прочности пород, слагающих междукамерные целики, является частным случаем выражения (2) при $k = 1$.

На рис. 2 приведены результаты экспериментального определения прочности слоистых образцов. В качестве сопоставления на рисунке приведены результаты теоретического определения эквивалентной прочности по формулам (1) и (2).

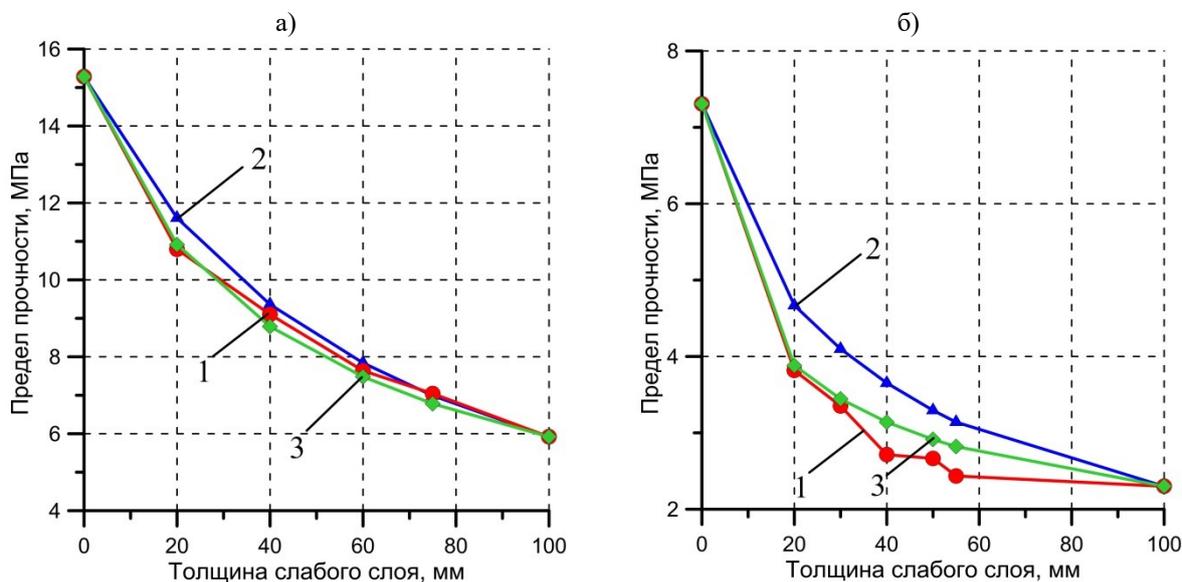


Рис. 2. Влияние толщины слабого слоя на изменение прочности цементно-песчаных образцов: а) двухслойные образцы; б) трехслойные образцы (1 – экспериментальные данные, 2 – формула гармонической средневзвешенной, 3 – модифицированная формула гармонической средневзвешенной)

Анализ проведенных исследований позволил сделать вывод, что выражение (2) достаточно хорошо описывает значения экспериментальной прочности слоистых образцов. При этом для разных видов образцов коэффициент степени принимает следующие значения: для двухслойных составных образцов $k = 1,6$, для трехслойных $k = 2,5$.

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., а также при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-45-590004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1978. – 390 с.: ил.
2. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей: утв. ПАО «Уралкалий», ЗАО «Верхнекамская калийная компания», ООО «ЕвроХим-Усольский Калийный комбинат». – введ. в действие 30.03.2017 в ред. 2014 г. – Пермь; Березники, 2014. – 130 с.
3. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – Введ. 1986-01-07. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 10 с.
4. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. – Введ. 24.04.91. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 10 с.