Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им.Г.В.Плеханова, т.XIУ, вып. 1, 1974 г.

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ СЛОИСТОГО МАТЕРИАЛА ОТ СЦЕПЛЕНИЯ И ТРЕНИЯ НА КОНТАКТАХ СЛОЕВ

О.В.Тимофеев, Р.Э.Дашко, Н.С.Конокотов

Осадочные горные породы обычно имеют слоистое строение, причем прочностные характеристики на контактах слоев (сцепление $c_к$ и угол внутреннего трения $\varphi_к$) могут изменяться от нуля до их значений в материале слоя ($c_м$ и $\varphi_м$).

При оценке прочности и устойчивости элементов горных выработок, пройденных в слоистых породах, необходимо располагать показателями прочности слоистой среды ($c_{сл}$ и $\varphi_{сл}$) при различных значениях этих показателей в слое и на контактах слоев и различных углах их расположения относительно направления наибольшего нормального напряжения. Выявление указанной зависимости имеет большое практическое и теоретическое значение, поэтому экспериментальным исследованиям в этой области в настоящее время уделяется большое внимание.

Наибольшее число работ посвящено исследованию влияния трещиноватости и слоистости массива пород на его прочность при сжатии [2,3,4,6,7,8, 9, 10], а также влияния слабых слоев на прочность целиков [1,5]. Во всех работах отмечено большое влияние слоистости и трещиноватости на прочность материала, однако в них практически нет данных о зависимости этого показателя от величины трения и сцепления по контактам слоев, представленных весьма тонкими слабыми прослойками.

Исследованию этой зависимости на образцах из эквивалентного песчано-парафинового материала (3% парафина) посвящена данная работа. Испытания проведены на одноплоскостном сдвиговом приборе института Гидропроект с цилиндрическими образцами диаметром 7,14 см (площадью 40 $см^2$), которые вырезались из призматических слоистых блоков, изготовленных путем затирки по известной методике ВНИМИ. Толщина слоев составляла 1,7 см, слабых прослойков на контактах слоев – не более 1 мм. Испытаны образцы с восемью типами контактов, а также образцы из монолитного материала. Испытания образцов на сдвиг проведены при различных величинах напряжений, перпендикулярных плоскости сдвига: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 $кг/см^2$ при сдвиге вкрест слоистости и 0,5; 1,0 и 1,5 $кг/см^2$ при сдвиге по контакту слоев. Минимальная величина нормальных напряжений принята такой, чтобы при сдвиге верхняя часть образца не отрывалась от нижней, максимальная – чтобы не было пластических деформаций материала. Сдвигающая нагрузка задавалась весом сосуда с водой, которая постепенно вливалась через трубку из мерной емкости со средним расходом 0,4 л/мин, благодаря чему обеспечивалась плавность нагружения и высокая точность испытаний. Каждый опыт в зависимости от прочности материала продолжался 10–20 мин.

Вначале испытывались образцы на сдвиг по контакту слоев, затем – вкрест слоистости.

При указанных размерах образцов и толщине слоев плоскость сдвига при испытании вкрест слоистости пересекала четыре контакта слоев.

Необходимое число испытаний при каждом значении нормальной нагрузки определялось по известной в математической статистике формуле

$$n = \frac{t_\alpha^2 \sigma^2}{\varepsilon^2} , \qquad (1)$$

где n – число испытаний; t_α – табулированное значение интеграла вероятности, зависящее от величины надежности α; σ – квадратичное значение отклонения показателя прочности; ε – необходимая точность определения, значением которой задаются.

В опытах принят нормальный закон распределения показателей прочности материала, точность определения их величины 10% и величина надежности $\alpha = 0{,}85 - 0{,}95$, чего вполне достаточно при установлении общей закономерности изменения прочности слоистого материала от величины сцепления и угла трения по контактам слоев. В табл.1 приведено рассчитанное по формуле (1) число испытаний на сдвиг вкрест слоистости при разных значениях величины надежности.

Таблица 1

Нормальное напряжение, кг/см^2	Точность определения, кг/см^2	Квадратичное отклонение	Число испытаний при величине надежности		
			0,85 $t_\alpha = 1{,}44$	0,90 $t_\alpha = 1{,}65$	0,95 $t_\alpha = 1{,}96$
1,0	0,08	0,14	6	8	12
1,5	0,10	0,15	5	6	7
2,0	0,13	0,16	3	4	5
2,5	0,16	0,17	2	3	4

Разброс результатов при определении прочностных характеристик по контакту слоев не превышал 3%, поэтому число испытаний при каждой вертикальной нагрузке принималось не более 3–4.

Результаты испытаний слоистых образцов из эквивалентного песчано – парафинового материала на срез вкрест слоистости при различных типах контактов между слоями представлены в табл. 2. Там же приведены данные для монолитного материала.

По данным экспериментов, на рис.1 нанесены 4 точки, соответствующие $c_к = 0{,}4;\ 0{,}55;\ 1{,}25;\ 1{,}85$ кг/см^2, которые позволяют оценить зависимость c_1 от $c_к$ как линейную в виде $c_1 = 0{,}950 + 0{,}485\, c_к$. Дополнительным подтверждением справедливости этой зависимости может служить пятая точка при $c_к = 0$, положение которой на оси абсцисс найдено приближенно пу-

Таблица 2

Тип контакта	Материал на контакте слоев	Показатели прочности				$\frac{c_к}{c_м}$	$\frac{tg\varphi_к}{tg\varphi_м}$	$\frac{c_\perp}{c_м}$
		на контакте слоев		вкрест слоистости				
		$c_к$, кг/см^2	$\varphi_к^\circ$	$c_\perp$, кг/см^2	$\varphi_\perp^\circ$			
1	Мика тонкомолотая, расход 0,01 г/см^2	1,25	23	1,5	23	0,675	1,00	0,810
2	Мика тонкомолотая, расход 0,024 г/см^2	0,55	23	1,3	23	0,297	1,00	0,703
3	Мика крупночешуйчатая, расход 0,024 г/см^2	0,40	25	1,1	23	0,216	1,10	0,595
4	Мика тонкомолотая 70%, вазелин технический 30%, расход 0,1 г/см^2	0,40	23	1,0	23	0,216	1,00	0,540
5	Графит $D<0,25$ – 50%, мика тонкомолотая 50%, расход 0,1 г/см^2	0,40	18	0,9	23	0,216	0,767	0,486
6	То же, расход 0,2 г/см^2	0,40	14	0,8	23	0,216	0,590	0,432
7	Контакты без добавок (образованы разрезкой монолитного образца)	0	30	1,15	23	0	1,360	0,620
8	Вазелин технический, нанесенный вручную, расход 0,2 г/см^2	0	10	0,85	23	0	0,415	0,340
9	Монолитный образец	1,85	23	1,85	23	1,0	1,00	1,0

Примечание. $c_к$, $c_м$, $c_\perp$ – сцепление, соответственно, по контакту слоев, в монолитном материале и вкрест слоистости; $\varphi_к$, $\varphi_м$, $\varphi_\perp$ – угол внутреннего трения в аналогичных случаях.

тем интерполяции данных, приведенных в табл.2 для контактов 7-го и 8-го типов ($c_\perp \approx 0,95$).

Для выявления зависимости $c_\perp = F(\varphi_к)$ в табл. 2 содержится также четыре результата при $c_к = 0,4$ кг/см^2. Расположение на рис. 2 точек, соответствующих $\varphi_к = 14^\circ$, 18°, 23° и 25° ($tg\varphi_к = 0,250$; $0,325$; $0,424$ и $0,466$), позволяет оценить указанную выше зависимость как линейную типа $c_\perp = a + 1,25\, tg\varphi_к$. В частном случае, при $c_к = 0,4$ кг/см^2 $a = 0,49$ кг/см^2 (прямая 1). При $c_к = 0$ в табл. 2 имеются результаты испытаний, соответствующие $\varphi_к = 10$ и 30°. Построенная по ним прямая 2 оказалась параллельной прямой 1.

Полученные данные позволяют предположить, что в исследованном интервале величин зависимость сцепления в слоистом образце, при его испытании вкрест слоистости, от угла внутреннего трения и от сцепления на контакте слоев может быть представлена семейством параллельных прямых, каждая из которых соответствует некоторому значению $c_к$. По данным табл.2 при постоянном $\varphi_к = 23^\circ = \varphi_\perp$ ($tg\varphi_к = 425$) и типах контактов 2, 1 и 9 на рис.2 построены прямые 3–5, параллельные прямым 1 и 2. Прямая 5 относится к слу-

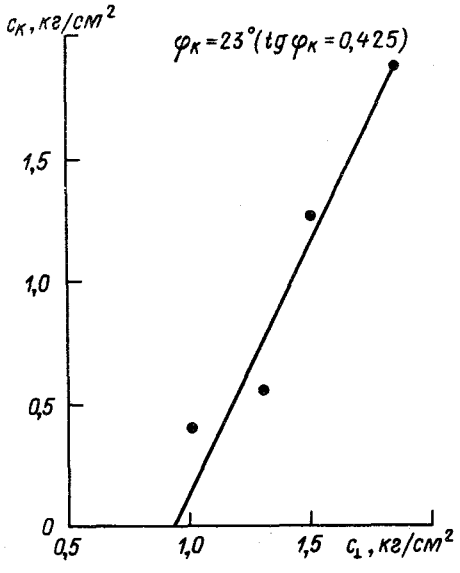


Рис. 1. Зависимость сцепления $c_\perp$ в слоистом образце от сцепления $c_к$ на контакте слоев при $\varphi_к = \varphi_м = 23°$

чаю, когда сцепление на контакте слоев равно сцеплению в слое, а угол внутреннего трения на контакте изменяется.

Суммарное влияние $c_к$ и $\varphi_к$ на сцепление в слоистом образце $c_\perp$, по данным проведенных экспериментов, приближенно выражается зависимостью

$$c_\perp = 0{,}425 + 0{,}485 c_к + 1{,}25\, tg\varphi_к \quad (2)$$

Угол внутреннего трения $\varphi_\perp$ в слоистом образце (см. табл. 2) не зависит от механических характеристик на контакте слоев ($c_к$ и $\varphi_к$) и равен углу внутреннего монолитного образца $\varphi_м = 23°$. Для удобства практического применения полученных данных и возможности их сопоставления с результатами других ис-

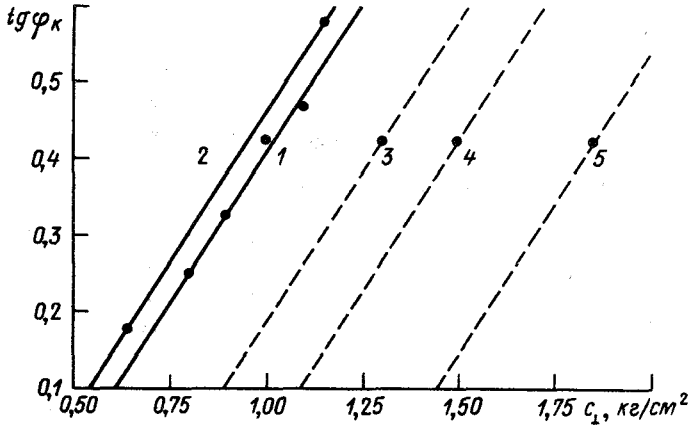


Рис. 2. Зависимость сцепления $c_\perp$ в слоистом образце от угла внутреннего трения $\varphi_к$ на контакте слоев:
1 – $c_к$ = 0,40; 2 – 0; 3 – 0,55; 4 – 1,25; 5 – 1,85 кг/см²

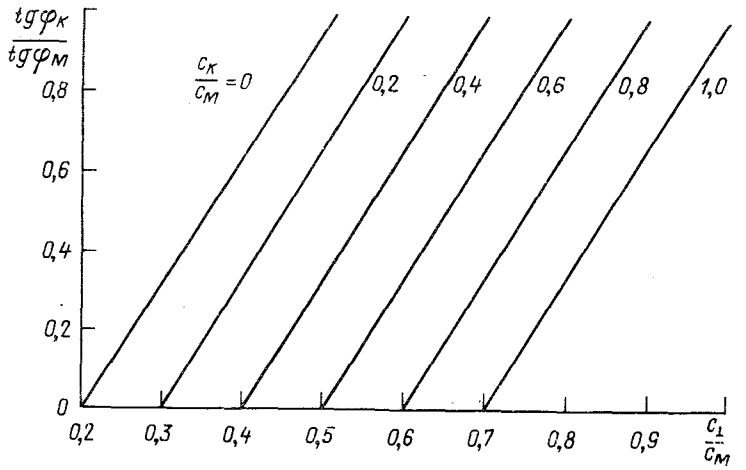


Рис. 3. Безразмерная зависимость сцепления c_1 в слоистом образце от сцепления и угла внутреннего трения $\varphi_к$ на контакте слоев

таний зависимость $c_1 = F(tg\varphi_к, c_к)$ целесообразно представить в безразмерных величинах, откладывая по оси абсцисс отношения $c_1 : c_м$, а по оси ординат $tg\varphi_к : tg\varphi_м$. На рис. 3 построено семейство прямых, соответствующих значениям $c_к : c_м$ в пределах от 0 до 1 с интервалом 0,2. Поскольку зависимость c_1 от $c_к$ принята прямолинейной (рис. 1), интервал между параллельными прямыми принят одинаковым. В соответствии с графиком рис.3 искомая безразмерная зависимость, аналогичная зависимости (2),может быть представлена приближенной эмпирической формулой

$$\frac{c_1}{c_м} = 0{,}2 + 0{,}5\,\frac{c_к}{c_м} + 0{,}3\,\frac{tg\varphi_к}{tg\varphi_м}\,. \qquad (3)$$

Рассмотренные результаты получены при сдвиге образцов по плоскости, перпендикулярной плоскостям наслоения. При других углах встречи плоскостей сдвига и наслоения показатели прочности могут изменяться. Для количественной оценки этого фактора воспользуемся результатами исследований Н.А.Филатова [8], который испытывал слоистые образцы из эквивалентного песчано-парафинового и песчано-гипсового материала в условиях одноосного и объемного сжатия при различных углах α наклона слоев относительно направления минимального главного нормального напряжения σ_2. Полученная им относительная величина прочности k_α (максимального главного нормального напряжения σ_1) в зависимости от угла α составила в среднем:

α	0	15	30	45	60	75
k_α	1	0,92	0,75	0,65	0,50	0,60

Минимальное значение k_α получено при $\alpha = 60^\circ$. Эти данные получены при напряжениях σ_2, не превышавших предела прочности материала на одноосное сжатие.

Для определения расчетного значения сцепления c_α при $\alpha > 0$ определенное по формуле (3) значение c_1 следует умножить на коэффициент k_α, соответствующий углу наклона слоев к нормали относительно направления максимального главного нормального напряжения (или сдвигающего усилия). При этом следует иметь в виду, что при угле внутреннего трения по контакту слоев $\varphi_к < 90^\circ - \alpha$ сдвиг происходит по контакту [4].

Выводы

1. Предложенные в работе комбинации материалов для получения различных типов контактов между слоями при моделировании методом эквивалентных материалов обеспечивают возможность изменения угла внутреннего трения в пределах 10–30° и удельного сцепления в пределах 0 – 1,85 кг/см^2.

2. В результате испытаний слоистых образцов на срез со сжатием вкрест слоистости получена эмпирическая зависимость удельного сцепления c_1 слоистого материала от сцепления и угла внутреннего трения в монолитном материале ($c_м$ и $\varphi_м$) и на контакте слоев ($c_к$ и $\varphi_к$). Величина угла внутреннего трения φ_1 не зависела от характеристик на контактах и равнялась $\varphi_м$.

3. Для определения удельного сцепления слоистого материала при различном наклоне слоев относительно направления главных нормальных напряжений предложено использовать поправочные коэффициенты k_α к значению c_1, определенному по формуле (3), составленные по данным исследований Н.А.Филатова.

Литература

1. Безкаравайный В.Г. Устойчивость неоднородных целиков. Зап. ЛГИ, т.49, вып. 1, 1964.

2. Борисенко С.Г., Сорокин А.Д., Гузченко В.Г. Исследование влияния трещиноватости пород на устойчивость целика. Известия вузов. – "Цветная металлургия", 1964, № 2.

3. Борщ-Компаниец В.И., Мартынов Ю.И. К вопросу устойчивости трещиноватой кровли. Известия вузов. – Горный журнал, 1963, № 1.

4. Ким Д.Н. Влияние структуры на сдвиговую прочность массива и определение расчетных механических характеристик. Тр. ВНИМИ, сб. 72. 1969.

5. Кузнецов Г.Н. Бублик Ф.П. Кузнецов С.Т. Прочность неоднородных междукамерных целиков. Тр. ВНИМИ, сб. 45, 1962.

6. Мартынов Ю.И. Прочностные свойства трещиноватых горных пород. Известия вузов. – Горный журнал, 1963, № 3.

7. Прочность скальных горных пород в массиве. Известия вузов. – Горный журнал, 1966, № 7. Авт.: Ю.И.Туринцев, Т.П.Бахарева, П.И.Зобнин, П.П.Бастан.

8. Филатов Н.А. Зависимость прочностных и деформационных свойств образцов из эквивалентных материалов от направления их слоистости, Тр. ВНИМИ, сб. 60, 1966.

9. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров. М., "Недра", 1965.

10. Харитонов Н.И. О влиянии слоистости и трещиноватости на механическую прочность материалов. Известия вузов. – Горный журнал, 1965, № 8.