

УДК 539.374 + 622.831

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ АНИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД
В УСЛОВИЯХ ОСЕВОГО СЖАТИЯ С БОКОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ**

А. М. Коврижных, О. М. Усольцева, С. А. Коврижных, П. А. Цой, В. Н. Семенов

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: amkovr@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Представлены теоретические и экспериментальные исследования основных прочностных характеристик цилиндрических образцов из слоистых и анизотропных геоматериалов при их осевом сжатии и боковом давлении. Испытания образцов проводились на сервогидравлическом прессе INSTRON 8802. Получены зависимости изменения предела прочности искусственного материала, метаалевролита и сланца от угла напластования. Результаты теоретических расчетов удовлетворительно согласуются с данными опытов.

Анизотропия, слоистость, трещиноватость, предел прочности, разрушение горных пород

DOI: 10.15372/FTPRPI20170505

Одними из основных допущений, обычно принимаемых в классических теориях пластичности и разрушения, являются предположения об изотропии и однородности материала [1–7]. Однако все реальные материалы: металлы, строительные элементы, скальные горные породы и грунты в той или иной степени обладают свойствами неоднородности и анизотропии [8–12]. Анизотропия — отличительная особенность пластической деформации кристаллов. Известно, что сдвиги и вызываемое ими упрочнение происходят ориентированно в некоторых кристаллографических плоскостях по определенным направлениям, что приводит к анизотропии прочностных свойств материалов, разрушение которых протекает в условиях пластичности или ползучести [3, 5, 8]. Это наблюдается во многих случаях необратимого деформирования при обработке металлов давлением (прокатка, прессование, волочение, ковка) либо в процессе метаморфизма горных пород (твердофазное минеральное и структурное изменение горных пород под воздействием температуры и давления в присутствии флюида).

Таким образом, при высоких механических напряжениях структурные элементы вместо беспорядочной ориентировки в поликристалле приобретают текстуру, связанную с главными направлениями пластических деформаций, что и обуславливает анизотропию механических свойств материалов за пределом упругости [8–12].

Экспериментальная часть исследований выполнена на оборудовании ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН.

Анизотропия и неоднородность механических свойств присуща как породным массивам, так и определенным горным породам. Прежде всего следует различать начальную или исходную анизотропию нетронутого горного массива; вторичную или деформационную, т. е. изменившуюся относительно первоначального состояния. Отличительной особенностью нетронутого массива горных пород (перед разработкой месторождения) является то, что в каждой “точке” этот массив нагружен, т. е. в нем имеются начальные поля напряжений и деформаций. С увеличением глубины разработки месторождений уровни действующих напряжений и деформаций повышаются, и в негидростатическом поле напряжений вследствие необратимых деформаций пластичности или ползучести возникает деформационная анизотропия. Можно предположить, что анизотропия вызвана проявлением локализационных полос сдвига с одновременным увеличением пористости и снижением прочности при сдвиге в определенных направлениях [5, 8]. Так образуется текстура горной породы, разделенной и ослабленной параллельными трещинами. Трещиноватость также может быть начальной или исходной, а может быть вторичной или деформационной.

При прогнозе, изучении и разработке нефтяных и газовых месторождений зоны трещиноватости пород рассматриваются как возможные “резервуары” нефти и газа, но главным образом — как структуры, определяющие процессы фильтрации и накопления углеводородов. Оценка общих запасов нефти и газа на месторождении, выбор эффективных способов и средств воздействия на пласт с целью повышения коэффициентов извлечения нефти и газа предполагают хорошее знание типа коллектора, соотношения трещин и пор, их раскрытости и взаимосвязанности и дифференциации по степени значимости для фильтрации [11]. Трещиноватость горных пород — определяющий фактор в процессе дегазации угольных пластов при разработке угольных месторождений, фильтрации и инфильтрации наземных и подземных вод в горные выработки разного назначения.

Значительная доля общей трудоемкости и общих затрат в горнодобывающей промышленности приходится на процессы взрывного разрушения массива, дробление и измельчение пород, углей и руд. Выбор оптимальных параметров буровзрывных работ, способов и средств дробления и измельчения невозможен без надлежащего учета естественной блочности и трещиноватости горных пород [11].

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ КУЛОНА – МОРА ДЛЯ АНИЗОТРОПНЫХ, ТРЕЩИНОВАТЫХ И СЛОИСТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Анализируя имеющиеся в литературе многочисленные экспериментальные исследования, можно с уверенностью утверждать, что как для пластичных, так и для хрупких материалов возникновение необратимых деформаций связано с критерием Кулона – Мора [2]:

$$\max_n [|\tau_n| + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi] = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi = C, \quad (1)$$

где C — прочностная постоянная; φ — угол внутреннего трения; n — нормаль к площадке, на которой действуют касательное и нормальное напряжения τ_n и σ_n .

В (1) предполагается, что главные нормальные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ занумерованы так, что $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ и среднее главное напряжение σ_2 не учитывается при определении начала разрушения. Однако для осесимметричного нагружения, когда $\sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3$, критерий (1) вполне удовлетворительно согласуется с результатами опытов Фойхта, которые приводятся в [6]. Разрушение происходит в результате сдвига по предельным плоскостям, составляющим с направлением максимального касательного напряжения угол $\varphi/2$.

Для пластичных металлов условие (1) при $\varphi = 0$ соответствует критерию текучести Треска–Сен-Венана. Характеристики материала φ и C могут быть получены по результатам двух опытов, например, на одноосное сжатие и осевое сжатие с боковым давлением соответственно. Пусть σ_c — предел прочности (пластичности) при одноосном сжатии. При совместном действии осевого сжатия и бокового давления $\sigma_3 = -\sigma^*$, $\sigma_1 = \sigma_2 = -p$. Если из опыта в момент разрушения известны значения σ^* и p , то из (1) можно найти:

$$\sin \varphi = \frac{\sigma^* - \sigma_c - p}{\sigma^* - \sigma_c + p}, \quad C = \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \sigma_c. \quad (2)$$

Учитывая (2), запишем соотношение между прочностными параметрами и боковым давлением:

$$\sigma^* = \sigma_c + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} p. \quad (3)$$

Предположим, что цилиндрический образец (рис. 1а) изготовлен из однородного изотропного материала, имеющего коэффициент сцепления $C = k$ и угол внутреннего трения φ . По критерию Кулона–Мора (1) для данного напряженного состояния плоскость разрушения будет проходить через второе главное направление и ось t , которая составляет с направлением l угол $\pi/4 + \varphi/2$ (рис. 1б). Нормаль n к оси t имеет с осью l угол $\psi = \pi/4 - \varphi/2$.

Рассмотрим осевое сжатие цилиндрического образца при одновременном действии бокового давления $\sigma_3 = -\sigma^*$, $\sigma_1 = \sigma_2 = -p$ (схема нагружения Кармана, рис. 1а). Пусть $\sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3$, где σ_3 — наибольшее сжимающее напряжение. Критерий (1), как и следующее из него условие (2), не зависят от промежуточного главного напряжения σ_2 , но вполне удовлетворительно согласуются с результатами опытов Фойхта, которые проводились по схеме Кармана [6].

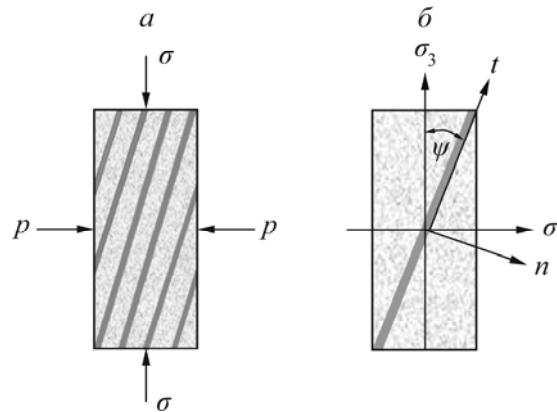


Рис. 1. Схема нагружения цилиндрического образца (а); однородный материал с одним слоем (б)

Теперь возьмем неоднородный цилиндрический образец, состоящий из прочного и слабого материалов. Слабый слой имеет меньший коэффициент сцепления $C = k_c < k$, а углы внутреннего трения у этих материалов могут различаться, т. е. $\varphi_c \neq \varphi$. На рис. 1б приводится один слабый слой. Пусть ось t направлена вдоль слоя, а ось n перпендикулярно t . Рассмотрим тензор напряжений в прямоугольной системе координат (n, t) , связанной с направлением слоистости:

$$\begin{aligned}\sigma_n &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\psi = -\frac{\sigma - p}{2} + \frac{\sigma + p}{2} \cos 2\psi, \\ \sigma_t &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\psi = -\frac{\sigma - p}{2} - \frac{\sigma + p}{2} \cos 2\psi, \\ \tau_{nt} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\psi = \frac{\sigma - p}{2} \sin 2\psi.\end{aligned}\tag{4}$$

Запишем условие прочности для материала слабого слоя, направленного по оси t . Из рис. 1б видно, что угол между направлениями $(3, t)$ равен ψ . Учитывая (4), критерий Кулона–Мора можно представить в следующем виде:

$$|\tau_n| + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi_c = \frac{\sigma - p}{2 \cos \varphi_c} \sin (2\psi + \varphi_c) - \frac{\sigma + p}{2} \operatorname{tg} \varphi_c = k_c.\tag{5}$$

Разрешая условие прочности (5) относительно предельного напряжения $\sigma = \sigma_c^*$, получим

$$\sigma_c^* = p + 2 \frac{p \sin \varphi_c + k_c \cos \varphi_c}{\sin (2\psi + \varphi_c) - \sin \varphi_c}.\tag{6}$$

Наименьшее предельное напряжение σ_c^* в слабом слое возникает при $\psi = \pi / 4 - \varphi_c / 2$. Для прочного слоя, как и для однородного образца из этого же материала, имеем:

$$\sigma^* = p \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2k \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = p + 2 \frac{p \sin \varphi + k \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}.\tag{7}$$

Если толщина слоя t (рис. 1б) мала, то его с определенной степенью точности можно отождествлять с “трещиной”, у которой сохраняется сцепление между берегами, а после приложения касательного и нормального напряжений τ_n и σ_n разрушение происходит при выполнении условия прочности (5).

Рассмотрим цилиндрический образец с одной “трещиной” или слоем, в первом случае k_c и φ_c — это сцепление и угол трения между ее берегами, а во втором — сцепление и угол внутреннего трения для материала слабого слоя. Как следует из (6), наименьшее осевое напряжение, приводящее к разрушению образца по “трещине” (или слою), достигается при $\sin (2\psi + \varphi_c) = 1$, откуда $\psi = \pi / 4 - \varphi_c / 2$. Предельное напряжение σ_c^* в слое (6) при уменьшении угла ψ возрастает, но не может быть больше, чем предельное напряжение σ^* в наиболее прочном окружающем материале (7). Приравнивая эти напряжения, определим угол $\psi = \psi_*$, при котором разрушение слоя и окружающего его более прочного материала происходит при одном и том же напряжении. В результате для угла ψ_* имеем:

$$\psi_* = \frac{1}{2} \arcsin \left[\sin \varphi_c + (1 - \sin \varphi) \frac{p \sin \varphi_c + k_c \cos \varphi_c}{p \sin \varphi + k \cos \varphi} \right] - \frac{\varphi_c}{2}.\tag{8}$$

Рассмотрим материалы, для которых $\varphi = \varphi_c = 0$, а коэффициенты сцепления прочного и слабого материалов различаются в 2 раза, т. е. $k / k_c = 2$. Подставляя данные значения в (7), получим $\psi_* = 15^\circ$. В этом случае при углах ψ , удовлетворяющих неравенству $15^\circ < \psi < 75^\circ$, разрушение происходит по слабому слою. Когда $-15^\circ < \psi < 15^\circ$ либо $75^\circ < \psi < 105^\circ$, разрушение отмечается в направлении действия τ_{\max} , т. е. под углом 45° к главному направлению σ_1 . Если для тех же коэффициентов сцепления в (7) принять $\varphi = \varphi_c = 30^\circ$, то получим $\psi_* = 9^\circ$. Наличие

двух различных материалов в образце предполагает использование двух критериев разрушения с разными прочностными характеристиками, что согласно (7) при определенной ориентации слабого слоя ($\psi = \psi_*$) относительно осевой нагрузки равно разрушению по двум различным направлениям. При $\varphi = \varphi_c = 0$ из (7) имеем $\psi_* = 1/2 \arcsin(k_c / k)$.

Таким образом, для материалов без трения при ориентации трещины, определяемой (8), разрушение может происходить в направлении как самой трещины, так и действия максимального касательного напряжения. Нетрудно установить, что бифуркация процесса разрушения будет наблюдаться в материалах с другими прочностными характеристиками k и φ , а также с различным характером анизотропии и неоднородности.

СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ОБРАЗЦОВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ОТ УГЛА НАПЛАСТОВАНИЯ

Основная задача экспериментального исследования состояла в том, чтобы определить закономерности изменения прочностных свойств образцов искусственных геоматериалов и горных пород со слоистой структурой в зависимости от угла их внутреннего напластования при нагружении сжатием с боковым давлением.

Испытания образцов проводились на сервогидравлическом прессе INSTRON 8802, программа нагружения задавалась по перемещению траверсы прессы. В процессе экспериментов осуществлялось непрерывное измерение и запись контролируемых параметров в компьютерный файл: осевой нагрузки, продольных (изменение длины) и поперечных (изменение диаметра) деформаций в средней части образца с применением тензометра фирмы INSTRON, а также продольных деформаций между торцами образца. При испытаниях на объемное сжатие дополнительно записывалось боковое давление, подаваемое на образец, помещенный в компрессионную камеру. Пресс и комплект датчиков фирмы INSTRON соответствуют требованиям международных стандартов, позволяют получать прочностные и деформационные характеристики на всех стадиях нагружения образцов вплоть до их разрушения.

Обработана методика изготовления образцов из искусственного геоматериала, состоящего из двух слоев различного состава (первый слой: песок — 30 г, цемент — 10 г, клей Neolit — 4 г, вода — 2.5 г; второй: песок — 30 г, цемент — 5 г, клей Neolit — 3.5 г, вода — 2.5 г). Размеры цилиндрических образцов: длина 60, диаметр 30 мм. На рис. 2 приведены фотографии образцов искусственных геоматериалов до испытаний.

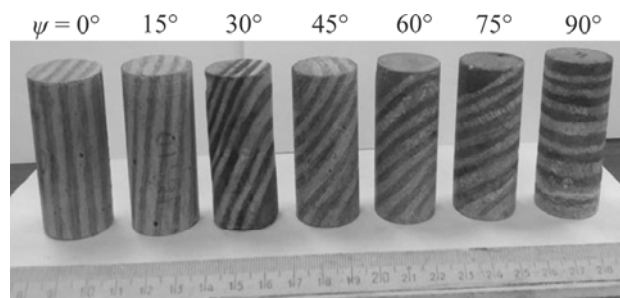


Рис. 2. Образцы искусственных геоматериалов до испытаний (ψ — угол напластования)

На данных образцах проведена серия экспериментов на одноосное и объемное сжатие при значениях бокового давления: 3 и 6 МПа (не менее трех образцов для каждого вида испытаний). Скорость деформирования составляла 1 мм/мин. Для каждого типа геоматериала построены зависимости предела прочности σ^* от угла напластования ψ (рис. 3).

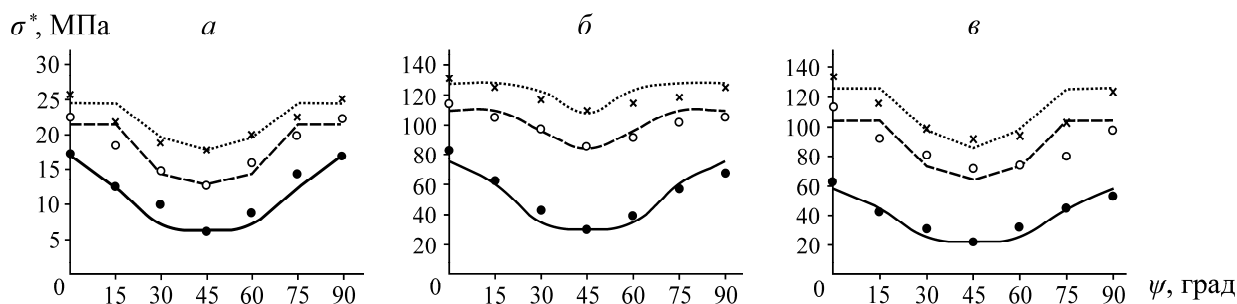


Рис. 3. Зависимости: *а* — пределов прочности образцов искусственного геоматериала от угла напластования при осевом сжатии с боковым давлением 0, 3 и 6 МПа; *б* — пределов прочности образцов метаалевролита от угла напластования при осевом сжатии с боковым давлением 0, 6 и 12 МПа; *в* — пределов прочности образцов сланца от угла напластования при осевом сжатии с боковым давлением 0, 6 и 12 МПа

Для метаалевролита и сланца боковые давления принимали значения 0, 6 и 12 МПа (рис. 3б, в). Результаты теоретических расчетов для этих давлений представлены сплошной, штриховой и пунктирной линиями соответственно, а результаты опытов — темными, светлыми кружками и крестиками. Прочностные характеристики для слабого слоя k_c и φ_c определялись из (6) при $\psi = \pi/4$ путем осреднения значений, полученных для различных боковых давлений. Характеристики k и φ находились по (7) как интегральные прочностные параметры однородного образца, ослабленного трещиной (слабым слоем, рис. 1б).

Расчеты выполнялись в предположении, что для каждого из слоев угол $\varphi = 0$, а коэффициенты сцепления k_c и k в направлении слоистости и в направлении τ_{max} вычислялись по результатам обработки опытных данных, приведенных на рис. 3.

Показатель	Искусственный геоматериал			Метаалевролит			Сланец		
	0	3.0	6.0	0	6	12	0	6	12
p , МПа	0	3.0	6.0	0	6	12	0	6	12
k , МПа	8.5	9.2	9.2	38	52	58	29	59	67
k_c , МПа	3.1	4.9	5.9	15	39	48	11	29	37

Анализируя приведенные в таблице значения параметров прочности k_c и k , характеризующих сцепление слабых и прочных слоев, можно отметить, что увеличение бокового давления приводит к повышению осевой прочности, что хорошо согласуется с многочисленными экспериментальными исследованиями на горных породах [7].

ВЫВОДЫ

Для слоистых и анизотропных геоматериалов предложен сдвиговый критерий прочности, в котором в зависимости от ориентации направлений главных осей напряжений по отношению к направлениям слоистости или анизотропии применяются критерии разрушения Кулона–Мора с разными прочностными параметрами для разных слоев и плоскостей анизотропии. Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей предельных напряжений от угла напластования в опытах на осевое сжатие с боковым давлением показывает удовлетворительное соответствие предлагаемого критерия разрушения результатам проведенных опытов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Надаи А.** Пластичность и разрушение твердых тел. — М.: Изд-во иностр. лит., 1954. — 648 с.
2. **Поль Б.** Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения // Разрушение. Т. 2. — М.: Мир, 1975. — С. 336–520.
3. **Фридман Я. Б.** Механические свойства металлов. — М.: Машиностроение, 1974. — Т. 1. — 472 с.
4. **Николаевский В. Н.** Механика пористых и трещиноватых сред. — М.: Недра, 1984. — 232 с.
5. **Коврижных А. М.** О жесткопластической модели деформирования и разрушения горных пород // ФТПРПИ. — 2003. — № 2. — С. 15–29.
6. **Тимошенко С. П.** Прочность и колебания элементов конструкций. — М.: Наука, 1975. — 704 с.
7. **Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г.** Пластичность горных пород. — М.: Недра, 1979. — 302 с.
8. **Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И.** О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах // ФТПРПИ. — 1974. — № 3. — С. 130–133.
9. **Опарин В. Н., Усольцева О. М., Семенов В. Н., Цой П. А.** О некоторых особенностях эволюции напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со структурой при их одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 3–19.
10. **Лехницкий С. Г.** Теория упругости анизотропного тела. — М.: Наука, 1977. — 416 с.
11. **Батугин С. А.** Анизотропия массива горных пород. — Новосибирск: Наука, 1988. — 85 с.
12. **Батугин С. А., Ниренбург Р. К.** Приближенная зависимость между упругими константами анизотропных горных пород и параметры анизотропии // ФТПРПИ. — 1972. — № 1. — С. 7–11.

Поступила в редакцию 14/VI 2017