



**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД  
СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ СРЕЗА СО СЖАТИЕМ**

**О. М. Усольцева, П. А. Цой, В. Н. Семенов**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: usoltseva57@mail.ru,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Проведено экспериментальное исследование влияния угла напластования на прочностные свойства образцов сланца и алевролита слоистой структуры при нагружении срезом со сжатием. Образцы сланца и алевролита имели существенную анизотропию прочностных свойств при тестировании на сжатие и растяжение. Испытания проводились при различных вариациях углов ориентации слоев относительно оси образца  $\Psi$  и углов ориентации плоскостей среза  $\Delta$  относительно напластования образца. Получены экспериментальные зависимости “предельное касательное напряжение  $\tau$  – нормальное напряжение  $\sigma$ ” и величины сцепления  $C_0$  от углов  $\Psi$  и  $\Delta$ . Установлено, что предел прочности и сцепление при срезе образцов сланца и алевролита слоистой структуры определяется комбинацией углов  $\Psi$  и  $\Delta$ . Для образцов с углом напластования  $\Psi = 0^\circ$  угол  $\Delta$  оказывает значительно более существенное влияние на характер разрушения, чем значения нормальных напряжений. Для образцов с  $\Psi = 45^\circ$  наблюдается комбинированный характер влияния угла  $\Delta$  и величины нормальных напряжений на характер разрушения образцов. Для образцов с ориентацией углов напластования  $\Psi = 90^\circ$  характер сдвига не зависит от угла  $\Delta$  и определяется только величиной нормальных напряжений.

*Лабораторный эксперимент, угол напластования, срез, предел прочности, сцепление*

**STRENGTH PROPERTIES OF ROCKS OF LAYERED STRUCTURE  
UNDER SHEAR LOADING WITH COMPRESSION**

**O. M. Usol'tseva, P. A. Tsoi, and V. N. Semenov**

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: usoltseva57@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

A laboratory study was conducted to investigate the effect of bedding angle on strength properties of shale and siltstone samples under shear loading with compression. The selected rocks had significant anisotropy of strength properties when tested for compression and tension. The samples of shale and siltstone were tested under shear loading with compression at various combinations of the orientation of bedding angles  $\Psi$  relative to the sample axis and the orientation of angles of shear plane  $\Delta$  relative to sample bedding. Experimental dependences “ultimate shear stress  $\tau$ –normal stress  $\sigma$ ” and adhesion value  $C_0$  on  $\Psi$  and  $\Delta$  angles are obtained. The study concluded that the ultimate shear strength and adhesion was determined by a combination of angles  $\Psi$  and  $\Delta$ . For samples with a bedding angle of  $\Psi = 90^\circ$ , the angle  $\Delta$  has a much more significant effect on the character of failure than the values of normal stresses. The combined effect of the angle  $\Delta$  and the values of normal stresses  $\sigma$  on the character of failure is observed for the samples with  $\Psi = 45^\circ$ . For samples with the orientation of bedding angles  $\Psi = 90^\circ$ , the shear strength does not depend on the angle  $\Delta$  and is determined only by the value of normal stresses.

*Laboratory experiment, bedding angle, shear loading, ultimate strength, adhesion*

Горная порода является сложноорганизованной неоднородной средой, во многих случаях проявляющей анизотропные свойства. В связи с этим важными становятся задачи детального изучения физическо-механических свойств анизотропных горных пород, а также их изменения в зависимости от структуры и условий приложения нагрузок. Обзор литературы за последнее время показывает, что большое внимание исследователей уделяется изучению влияния структуры горных пород, в частности слоистых сред, на развитие в них деформационных процессов при разных видах нагружения [1 – 12]. Однако поведение горных пород при сдвиговом нагружении изучено недостаточно, хотя именно сдвиг вдоль плоскости ослабления является одним из наиболее распространенных видов разрушения на склонах горных пород и в подземной горной инженерии. Данная статья посвящена исследованию прочностных свойств образцов сланца и алевролита слоистой структуры при испытаниях на сдвиг со сжатием.

Для испытаний выбраны три группы образцов сланца и песчаника с прослоями алевролита, в которых угол напластования  $\Psi$  изменялся: 1 группа — в пределах  $0 \pm 5^\circ$  (условно обозначим эту группу  $\Psi = 0^\circ$ ); 2 группа — в пределах  $40 - 50^\circ$  ( $\Psi = 45^\circ$ ); 3 группа — в пределах  $90 \pm 5^\circ$  ( $\Psi = 90^\circ$ ). Схематично ориентация углов напластования  $\Psi$  относительно оси цилиндрического образца показана на рис. 1.

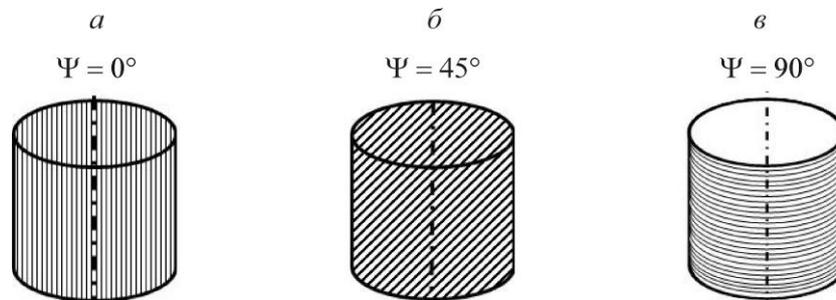


Рис. 1. Ориентация угла напластования  $\Psi$  относительно оси образцов: *a* —  $0^\circ$ , *b* —  $45^\circ$ , *v* —  $90^\circ$

Предварительно до проведения основной серии испытаний были определены прочностные характеристики пород в зависимости от угла напластования при растяжении и одноосном сжатии. Результаты представлены в таблице. Видно, что выбранные для исследований горные породы имели ярко выраженную анизотропию прочностных свойств.

Прочностные свойства образцов сланца и алевролита

Тип горной породы	Угол напластования $\Psi$ , град	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа
Сланец	90	12.1	91.8
	45	5.9	41.7
	0	5	45.2
Алевролит	90	18.2	149.4
	45	9.3	64.3
	0	8.2	71.2

Испытание на срез с сопряженным сжатием проводилось по методике, изложенной в [13]. Блок-схема и фотография устройства, предназначенного для испытаний на срез со сжатием, показана на рис. 2. Устройство включало в себя сменные разъемные матрицы, вкладыши с разрезными обоймами для установки образца под углами наклона  $\Theta = 25, 35, 45^\circ$ , а также опорное приспособление в виде стальных плит с роликовой постелью. Образцы для испытаний пред-

ставляли собой цилиндры диаметра 30 мм и длиной 30 мм. Испытания образцов осуществлялись на сервогидравлическом прессе INSTRON 8802, программа нагружения задавалась по перемещению траверсы пресса, скорость нагружения составляла 0.1 мм/мин. Предел прочности при сдвиге  $\tau$  и нормальное сжимающее напряжение  $\sigma$  вычислялись по формулам:

$$\tau = \frac{P}{S} \cos \Theta,$$

$$\sigma = \frac{P}{S} \sin \Theta,$$

где  $P$  — разрушающая сила;  $\Theta$  — угол между плоскостью среза и направлением действия разрушающей силы, задаваемой прессом;  $S$  — площадь плоскости среза образца ( $S = d \cdot L$ ,  $d$  — диаметр,  $L$  — длина образца).

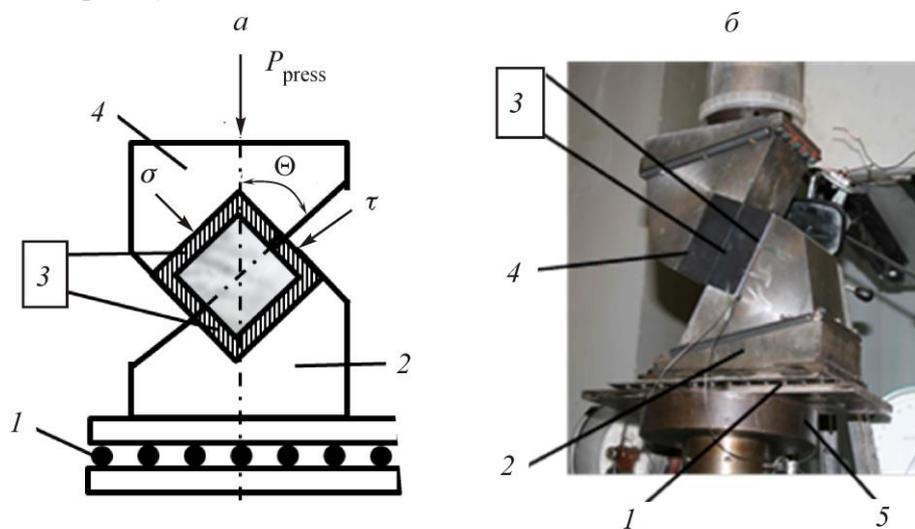


Рис. 2. Блок-схема (а) и фотография устройства (б), предназначенного для испытаний на срез со сжатием: 1 — роликовая постель; 2 — нижняя матрица; 3 — вкладыши; 4 — верхняя матрица; 5 — захват пресса

Испытания образцов сланца и алевролита выполнены при комбинации трех значений угла напластования  $\Psi = 0, 45, 90^\circ$  и трех значений угла ориентации плоскостей напластования относительно плоскости среза  $\Delta = 0, 45, 90^\circ$ . Схема ориентации углов  $\Delta$  приведена на рис. 3. Для каждого вида испытаний с фиксированными значениями углов  $\Psi$  и  $\Delta$  использовалось по 3–4 образца.

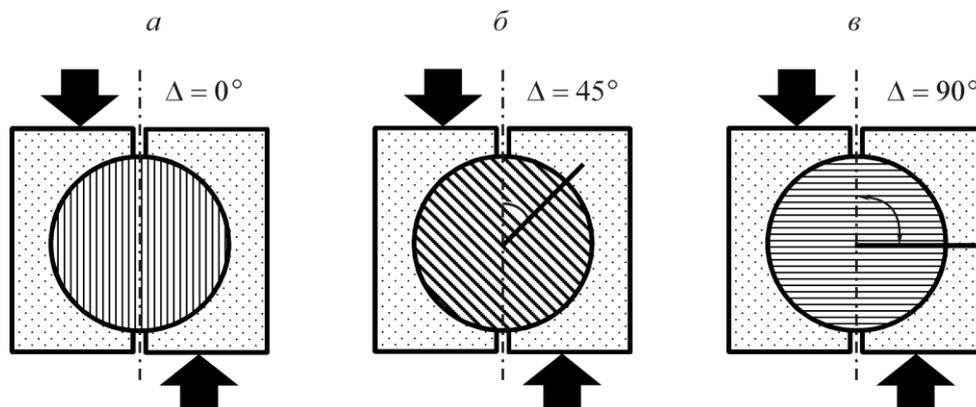


Рис. 3. Ориентация угла плоскости среза  $\Delta$  относительно напластования образца:  $\Delta = 0^\circ$  (а),  $\Delta = 45^\circ$  (б) и  $\Delta = 90^\circ$  (в)

Построены экспериментальные зависимости “предельное касательное напряжение  $\tau$  – нормальное напряжение  $\sigma$ ” при срезе со сжатием для образцов сланца и алевролита с различными значениями углов  $\Psi$  и  $\Delta$ . На рис. 4 представлены осредненные зависимости, сведенные в один график для каждой группы образцов  $\Psi = 0^\circ$ ,  $\Psi = 45^\circ$ ,  $\Psi = 90^\circ$ . Видно, что зависимости обеих горных пород качественно совпадают, различия состоят только в значениях напряжений, что подтверждает единые закономерности сдвигового деформирования и разрушения.

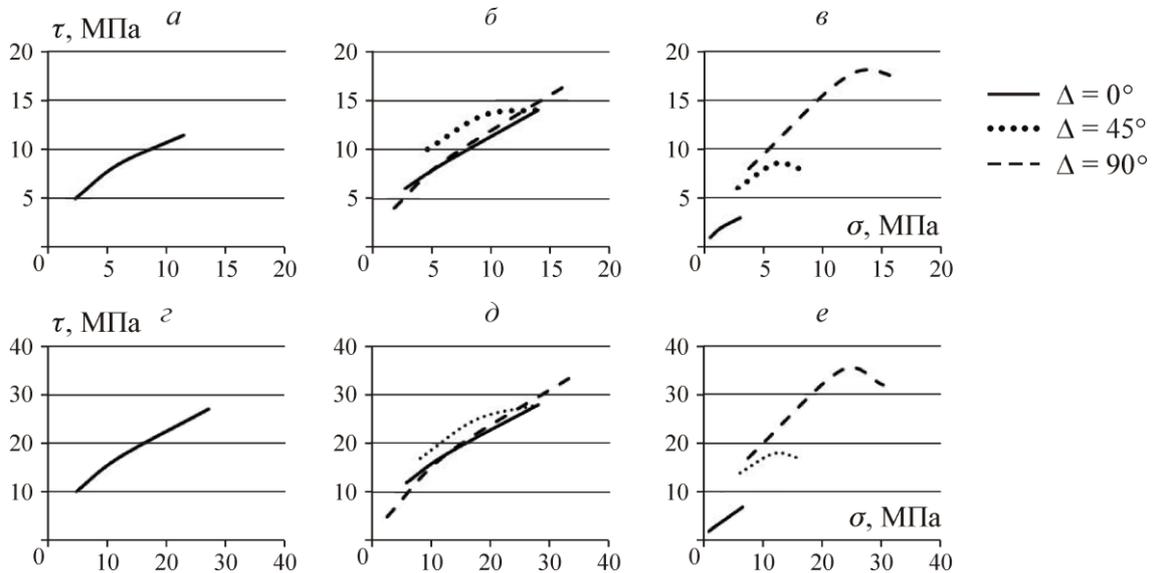


Рис. 4. Осредненные зависимости “предельное касательное напряжение  $\tau$  – нормальное напряжение  $\sigma$ ” при срезе со сжатием для образцов сланца (*a*, *b*, *v*) и алевролита (*z*, *d*, *e*) с различными значениями углов  $\Psi$  и  $\Delta$  для каждой группы образцов  $\Psi = 90^\circ$  (*a*, *z*),  $\Psi = 45^\circ$  (*b*, *d*) и  $\Psi = 0^\circ$  (*v*, *e*)

Для всех видов испытаний на срез со сжатием для осредненных кривых  $\tau - \sigma$  определены значения сцепления  $C_0$ . Применялась следующая методика: рассчитывался линейный наклон участка зависимости и затем линия, построенная по этой линейной функции, продлевалась до значений  $\sigma = 0$ . На рис. 5 показаны зависимости  $C_0$  от углов  $\Psi$  и  $\Delta$  для сланца и песчаника. Выполнен анализ форм разрушения образцов, на рис. 6 представлены фотографии некоторых из них после испытания.

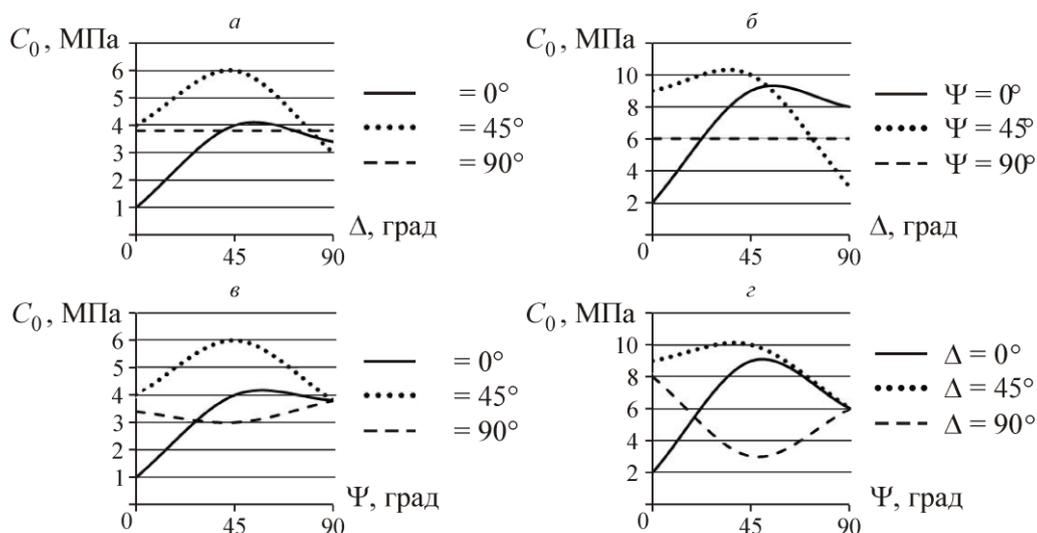


Рис. 5. Зависимости сцепления  $C_0$  от угла  $\Delta$  для образцов из сланца (*a*) и песчаника (*b*) при различных  $\Psi$ ; зависимости  $C_0$  от  $\Psi$  для образцов из сланца (*v*) и песчаника (*z*) при различных углах  $\Delta$

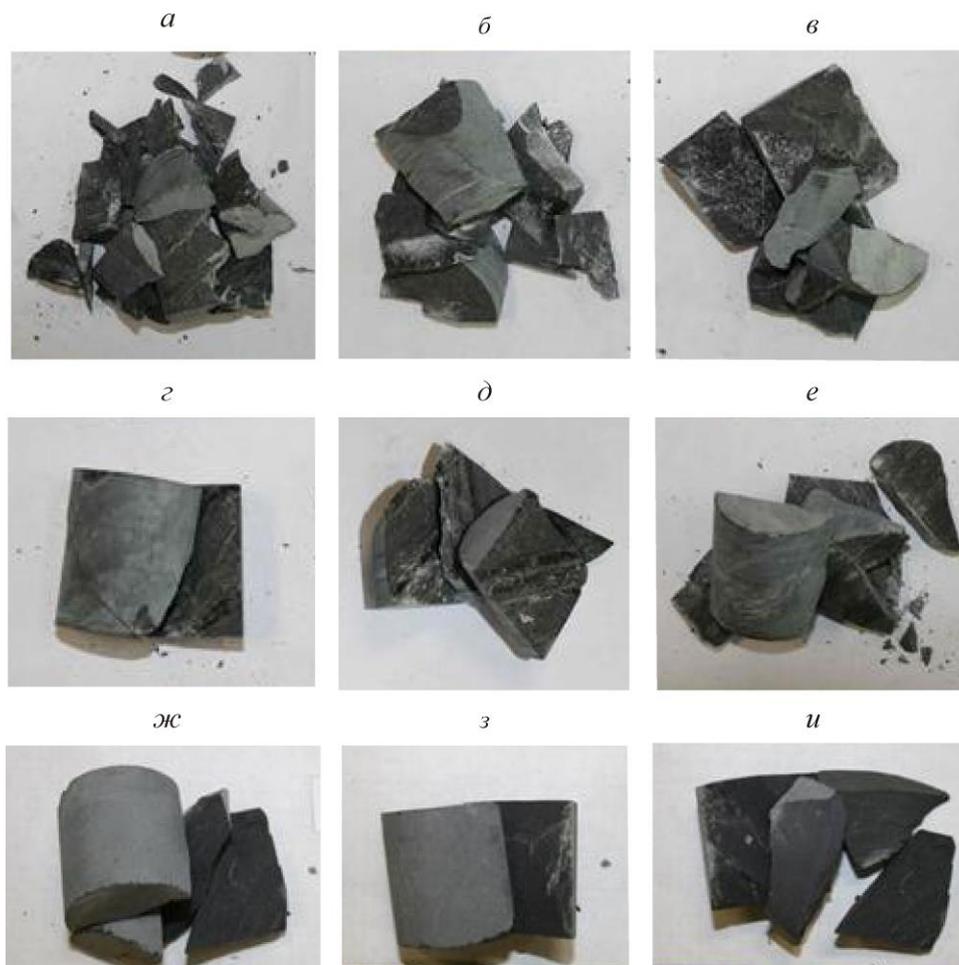


Рис. 6. Формы разрушения образцов с углом напластования  $\Psi = 90^\circ$  (а, б, в); образцов с углом  $\Psi = 45^\circ$  при  $\Delta = 0^\circ$  (г);  $\Delta = 45^\circ$  (д);  $\Delta = 90^\circ$  (е); образцов с углом  $\Psi = 0^\circ$  при  $\Delta = 0^\circ$  (ж); при  $\Delta = 45^\circ$  (з); при  $\Delta = 90^\circ$  (и)

Исследование полученных экспериментальных зависимостей  $\tau - \sigma$ ,  $C_0 - \Delta$ ,  $C_0 - \Psi$ , а также форм разрушения образцов с различными комбинациями значений угла  $\Psi$  и угла  $\Delta$  позволило сделать следующие выводы:

— для образцов с ориентацией углов напластования  $\Psi = 90^\circ$  (рис. 4а, г, 5, 6а, б, в) характер сдвига не зависит от угла  $\Delta$  и определяется только величиной нормальных напряжений. Воздействие сдвигового и нормального сжимающего напряжения приводит к тому, что возникающие растягивающие напряжения имеют решающее значение для процесса разрушения и вызывают раскол образца вдоль и поперек плоскостей ослабления. Образцы разрушались на большое количество осколков с большими значениями шероховатости поверхностей;

— для образцов группы  $\Psi = 45^\circ$  (рис. 4б, д, 5, 6г, д, е) наблюдается комбинированный характер влияния угла  $\Delta$  и величины нормальных напряжений  $\sigma$  на разрушение образцов. При увеличении угла  $\Delta$  от 0 до  $45^\circ$  его влияние на величину предела прочности при срезе возрастает, а при дальнейшем увеличении от 45 до  $90^\circ$  уменьшается. Основной формой разрушения является раскалывание вдоль плоскостей ослабления за счет действия растягивающих напряжений в комбинации с незначительным скольжением вдоль плоскостей ослабления. Причем, с увеличением угла  $\Delta$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  роль механизма скольжения уменьшается;

— для образцов с углом напластования  $\Psi = 0^\circ$  (рис. 4в, е 5, 6ж, з, и) угол  $\Delta$  оказывает более существенное влияние на характер разрушения, чем значения нормальных напряжений. При  $\Delta = 0^\circ$  плоскость среза совпадает с ориентацией плоскостей ослабления породы и разрушение

происходит только за счет скольжения по плоскостям ослабления. На рис. 4в видно, что любое увеличение угла  $\Delta$  приводит к увеличению влияния нормальных напряжений и повышению предела прочности на срез. Следовательно, к однотипному сдвиговому характеру разрушения при  $\Delta = 0^\circ$  добавляется поперечное разрушение через слои материала, которое становится доминирующим при  $\Delta = 90^\circ$ .

Для обеих горных пород тенденции изменения зависимостей  $C_0(\Psi)$  и  $C_0(\Delta)$ , полученные для однотипных испытаний качественно одни и те же (рис. 5). При  $\Delta = 0^\circ$  и увеличении угла напластования  $\Psi$  от 0 до  $45^\circ$  сцепление  $C_0$  возрастает для сланца примерно в 4.1 раза, для алевролита — в 4.5 раза. При дальнейшем возрастании угла  $\Psi$  от  $45^\circ$  до  $90^\circ$  сцепление уменьшается в 1.05 и 1.5 раза для сланца и алевролита соответственно. При  $\Delta = 45^\circ$  и увеличении  $\Psi$  от 0 до  $45^\circ$   $C_0$  возрастает для сланца примерно в 1.5 раза, для алевролита — в 1.1 раза. При последующем увеличении угла  $\Psi$  от  $45^\circ$  до  $90^\circ$  сцепление уменьшается в 1.6 и 1.7 раза для сланца и алевролита соответственно. Если  $\Delta = 90^\circ$  и  $\Psi$  увеличивается от 0 до  $45^\circ$   $C_0$  уменьшается для сланца примерно в 1.13 раза, для алевролита — в 2.7 раза. С возрастанием угла  $\Psi$  от  $45^\circ$  до  $90^\circ$  сцепление возрастает в 1.3 и 2 раза для сланца и алевролита соответственно.

Таким образом, для исследуемых двух типов пород сцепление имеет тенденцию увеличиваться при увеличении угла напластования от 0 до  $45^\circ$ , и далее уменьшаться при увеличении  $\Psi$  от  $45^\circ$  до  $90^\circ$ , максимальное значение сцепления принимает при  $\Psi = 45^\circ$ . Следует отметить, что эти экспериментальные зависимости построены для  $\tau$  и  $\sigma$ , осредненных по трем значениям угла  $\Delta = 0, 45, 90^\circ$ . Они отражают лишь общую тенденцию изменения предела прочности на сдвиг при различных значениях нормального напряжения. Однако в каждом отдельном случае комбинации  $\Psi$  и  $\Delta$  разрушение может произойти как при больших, так и при меньших значениях  $\tau$ . Особенно наглядно это демонстрирует рис. 4в, е.

## ВЫВОДЫ

Проведено экспериментальное исследование прочностных свойств образцов сланца и алевролита с прослоями песчаника, имеющих слоистую структуру, при срезе со сжатием. При испытаниях варьировали значения углов напластования  $\Psi$  относительно оси образцов и углов плоскости среза  $\Delta$  относительно напластования образцов. Анализ зависимостей предельного касательного напряжения от нормального напряжения, а также величины сцепления  $C_0$  от углов  $\Psi$  и  $\Delta$  показал, что прочностные характеристики данных анизотропных пород определяются комбинацией значений углов  $\Psi$  и  $\Delta$ . Найдены наиболее опасные их значения для сдвигового разрушения анизотропной породы. При  $\Psi = 90^\circ$  предел прочности породы зависит только от нормального сжимающего напряжения, угол среза влияния на прочность не оказывает. При  $\Psi = 45^\circ$  он зависит как от угла среза, так и от нормального напряжения, при  $\Psi = 0^\circ$  — от нормальных сжимающих напряжений в большей степени, чем от угла среза. Сцепление  $C_0$  принимает максимальное значение при  $\Delta = 45^\circ$  и несколько меньшее значение — при  $\Delta = 90^\circ$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Nasseri M. H., Rao K. S., and Ramamurthy T.** Failure mechanism in schistose rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1997, vol. 34, issue 3, 4, pp. 219.
2. **Serrano A. and Olalla C.** Ultimate bearing capacity of an anisotropic discontinuous rock mass, Part I: Basic modes of failure, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1998, vol. 35, pp. 301–24.
3. **Singh V. K., Singh D., and Singh T. N.** Prediction of strength properties of some schistose rocks from petrographic properties using artificial neural networks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2001, vol. 38, issue 2, pp. 269–84.

4. **Al-Harathi A. A.** Effect of planar structures on the anisotropy of Ranyah sandstone, Saudi Arabia. *Eng. Geol.*, 1998, vol. 50, pp. 49–57.
5. **Ghazvinian A., Geranmayeh R., Vaneghi M., Hadei R., and Azinfar M. J.** Shear behavior of inherently anisotropic rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2013, vol. 61, pp. 96–110.
6. **Niandou H., Shao J. F., Henry J. P., and Fourmaintraux D.** Laboratory investigation of the mechanical behavior of Tournemire shale, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1997, vol. 34, pp. 3–16.
7. **Tien Y. M., Kuo M. C.** A failure criterion for transversely isotropic rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2001, vol. 38, issue 3, pp. 399–412.
8. **Tien Y. M., Kuo M. C., and Juang Ch.** An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2006, vol. 43, pp. 1163–81.
9. **Ghazvinian A. and Hadei M. R.** Behavior of mechanical anisotropic specimens under triaxial testing. In: *Proceedings of the 2nd US–Canada rock mechanics symposium, and 42nd US rock mechanics symposium, 29 June–2 July 2008.*
10. **Basu A. and Kamran M.** Point load test on schistose rocks and its applicability in predicting uniaxial compressive strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2010, vol. 47, pp. 823–828.
11. **Usol'tseva O., Tsoi P., Semenov V.** The influence of anisotropy angle on the strength and deformation properties of artificial geomaterials and rocks, *Procedia Engineering*, 2017, vol. 191, pp. 512–519.
12. **Usol'tseva O. M., Tsoi P. A., and Semenov V. N.** Effects of structure on deformation and strength characteristics of transversely isotropic man-made geomaterials, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 53, Art. 012009, 5 pp.
13. **GOST 21153.5-88.** Rocks. Method for the determination of cut strength limit. [**ГОСТ 21153.5-88.** Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием.]