

АУКСЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Рязанцева Н.Ю. (КИИ ДонНТУ)
научный руководитель - Носач А.К.

В статье рассмотрены материалы с отрицательным коэффициентом поперечной деформации, показано, что горные породы являются классическими ауксетиками.

Ключевые слова: горная порода, объемное сжатие, напряжение, деформация, модуль всестороннего объемного сжатия, модуль сдвига, коэффициент поперечной деформации, предел сжимаемости.

В 1948-1955 г.г. под руководством О.Я. Берга [1] были выполнены микроскопические наблюдения над различными участками бетонных призм, подвергнутых сжатию. Параллельно проводились замеры поперечных и продольных деформаций бетона. Было установлено, что при нагрузках 0,75 призмной прочности прирост поперечной деформации начинает интенсивно возрастать, достигая половины величины прироста продольной деформации и более (рис.1).

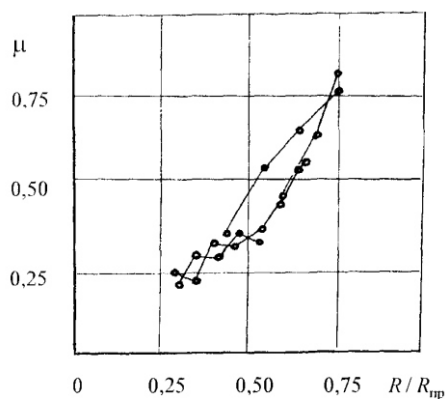


Рис.1 – Зависимость коэффициента поперечной деформации μ от относительного сжимающего напряжения $R/R_{пр}$ для бетона (R - текущее напряжение, $R_{пр}$ - призмная прочность).

По мнению авторов, когда коэффициент поперечной деформации превышает значение 0,5, то математически это обозначает увеличение объема при сжатии, а физически – увеличение количества микротрещин. Делается вывод о том, что коэффициент поперечной деформации при больших деформациях – это характеристика деформационных свойств композиции из основного неповрежденного материала и пустот, образованных вследствие накопления повреждений на микро- и макроуровнях.

Первые достоверные экспериментальные данные об отрицательных коэффициентах поперечной деформации в кристаллах кварца в области высоких температур опубликованы в 1962 году [2]. Потом, в 1963 году А. Гарбер зарегистрировал отрицательные значения коэффициента поперечной деформации для некоторых направлений в анизотропном модифицированном пиролитическом графите [3]. Приблизительно в то же время были описаны анизотропные армированные композиты с коэффициентом поперечной деформации ~ -2 [4,5].

В настоящее время к классическим ауксетикам относят пороматериалы [6,8]. Особенно выделяется класс сильно анизотропных пористых полимеров с размером пор менее 150 мкм [9,10], величина коэффициента поперечной деформации в которых достигает ~ -12 .

Среди кристаллических веществ выделяют аксиально- и неаксиально-ауксетические монокристаллы.

Кроме кристаллов металлов и сплавов ауксетические свойства установлены для 10 модификаций SiO_2 [11-17]. Имеются сведения, что отрицательные значения коэффициента поперечной деформации зафиксированы в трещиноватых гранитах и пористых песчаниках [18].

К ауксетикам относятся также многокомпонентные системы, в которых отрицательные значения коэффициента поперечной деформации обусловлены не структурно-механическими особенностями строения материалов, а физико-химическими взаимодействиями и являются следствием структурно-фазовых переходов [2,19-20].

В [21] для адекватного определения коэффициента поперечной деформации предлагается его связь с параметром Грюнайзена, который является мерой ангармоничности сил, действующих между атомами (молекулами) твердого тела. Авторами получены следующие формулы:

$$\gamma = \frac{3(1 + \mu)}{2(2 - 3\mu)} ;$$

$$\mu = \frac{\frac{4}{3}\gamma - 1}{2\gamma + 1} ;$$

где μ – коэффициент поперечной деформации; γ – параметр Грюнайзена.

Указанные зависимости свидетельствуют о том, что степень ангармонизма колебаний атомов в положении равновесия (γ) определяет механизм поперечной деформации (μ). При значениях $0,2 \leq \mu \leq 0,4$ имеем интервал $1,29 \leq \gamma \leq 2,63$, который соответствует наиболее часто встречаемым экспериментальным величинам параметра Грюнайзена. Для кристаллов, в которых выполняется соотношение Коши (между однородно деформированными областями решетки действуют центральные силы, $\mu = 0,25$), $\gamma = 1,5$. При $\mu = 0$ (продольное сжатие не сопровождается поперечным растяжением) $\gamma = 0,75$. Значение $\mu = -1$ соответствует «гармоническому кристаллу» $\gamma = 0$. Максимально возможное положительное значение $\mu = 0,67$ может быть достигнуто в условиях «неограниченного» ангармонизма $\gamma \rightarrow \infty$.

Горные породы являются поликристаллическими, многофазными системами с развитой микро- и макропористостью. Их можно отнести и к классу композитов, и к классу порошков (уголь, песчаник), и к классу веществ с полиморфными переходами. Основным породообразующим минералом силикатных пород является кварц, в десяти полиморфных модификациях которого установлены ауксетические свойства. Поэтому следует ожидать наличие ауксетических свойств у большинства горных пород. Об ауксетических свойствах гранита и песчаников упоминалось выше. Об аналогичных свойствах пород при одноосном сжатии свидетельствуют данные [22].

Для выявления характера изменения коэффициента поперечной деформации в осадочных горных породах проведены испытания кубических образцов песчаника, аргиллита и угля рис(2-4), на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия конструкции ДонФТИ АН Украины [23].

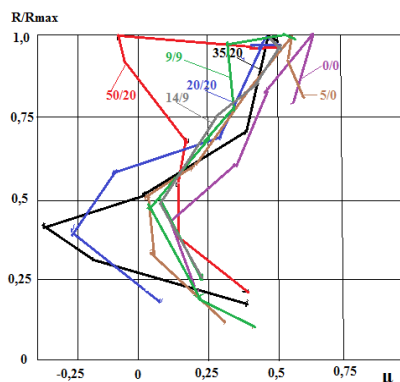


Рис. 2 – Изменения коэффициента поперечной деформации аргиллитов от степени нагружения

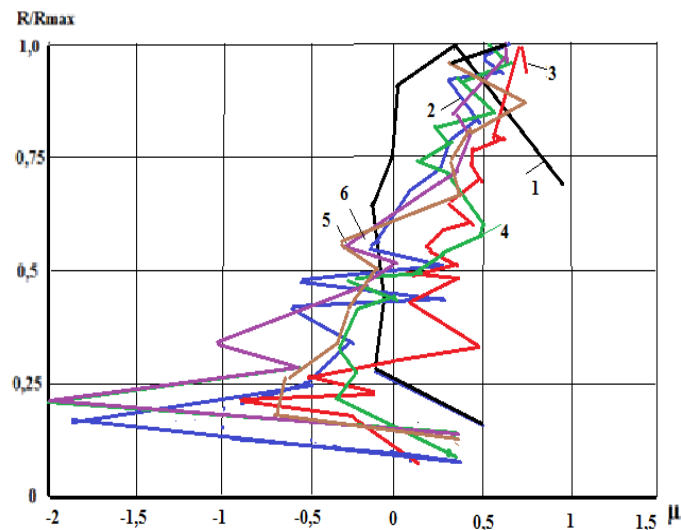


Рис. 3 – Изменения коэффициента поперечной деформации песчаников от степени нагружения: 1 – $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$; 2 – $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 9$ МПа; 3 – $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20$ МПа; 4 – $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, при $\sigma_2 = 19$ МПа, $\sigma_3 = 9$ МПа; 5 – $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, при $\sigma_2 = 25$ МПа, $\sigma_3 = 20$ МПа; 6 – $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, при $\sigma_2 = 35$ МПа, $\sigma_3 = 20$ МПа;

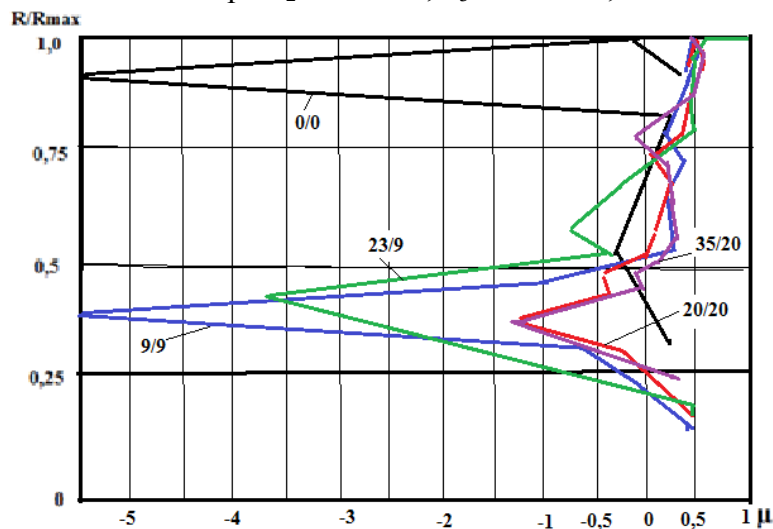


Рис. 4 – Изменения коэффициента поперечной деформации угольных образцов от степени нагружения

Нетрудно заметить, что при нагрузках до 0,5-0,75 от разрушающей породы имеют отрицательный коэффициент поперечной деформации. В ряде случаев отрицательный коэффициент поперечной деформации возникает также перед разрушением

На начальной стадии деформирования во многих случаях прирост сдвиговой деформации практически отсутствует (идет интенсивное уменьшение объема за счет закрытия существующих пор и трещин, уменьшения межплоскостных расстояний в глинисто-сланцевых минералах без изменения формы), модуль сдвига становится больше чем модуль объемного сжатия и коэффициент поперечной деформации принимает отрицательные значения (рис.5).

В этом случае порода ведет себя подобно поропластам. Вполне возможно, что в горном массиве эта стадия отсутствует или не так явно выражена. Отрицательный коэффициент поперечной деформации на стадии предразрушения является следствием структурно-фазового перехода (структурно-фазовый переход третьего рода сменяется переходом первого рода (изобарным скачкообразным уменьшением объема). При дальнейшем нагружении сдвиговая деформация возрастает практически при постоянном давлении, а объемная – постоянно меняет знак (становится знакопеременной).

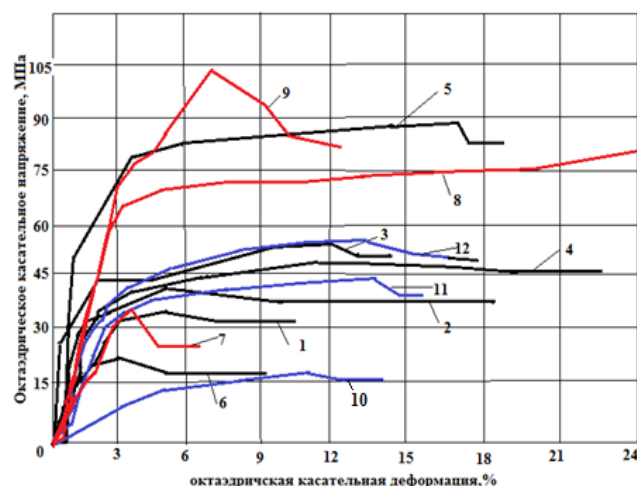


Рис. 5 – Зависимость «октаэдрическое касательное напряжение – октаэдрическая касательная деформация» для образцов горных пород в поле сжимающих напряжений: аргиллиты - 1, 2, 3 – $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 9 \text{ МПа}$; 4 – $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, $\sigma_2 = 20 \text{ МПа}$, $\sigma_3 = 16 \text{ МПа}$; 5 – $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20 \text{ МПа}$; 6 – $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$;

песчаники – 7 – $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$; 8 – $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 9 \text{ МПа}$; 9 – $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20 \text{ МПа}$;

уголь – 10 – $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$; 11 – $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 9 \text{ МПа}$; 12 – $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20 \text{ МПа}$.

Следует отметить существенное различие в деформировании и разрушении аргиллитов, песчаников и угля. В песчаниках наблюдается значительное количество структурно-фазовых переходов второго и третьего рода. После достижения предела сжимаемости (порога дилатансии) наблюдается зона упрочнения (наклеп), а разрушение осуществляется с увеличением объема. В аргиллитах после достижения порога дилатансии возможны два варианта. Первый сопровождается наклепом и разрушением со знакопеременной объемной деформацией с преимущественным уменьшением объема. Во втором варианте переход третьего рода трансформируется в переход первого рода с уменьшением объема, разрушение также происходит с уменьшением объема при постоянном давлении. В угольных образцах процесс деформирования и разрушения также сопровождается структурно-фазовыми переходами второго и третьего рода, наклепом и разрушением с уменьшением объема за счет схлопывания пор.

Приведенные экспериментальные данные, позволяют сделать следующие выводы:

1. На начальной стадии деформирования (до обжатия образца) коэффициент поперечной деформации горных пород имеет положительные значения и колеблется в пределах 0,37-0,42.
2. При дальнейшем нагружении он начинает уменьшаться, принимая, в том числе, и отрицательные значения. До предела сжимаемости (порога дилатансии) породы ведут себя как классические ауксетики. Наиболее ярко ауксетические свойства выражены в песчаниках и углях.
3. На пределе сжимаемости при нагрузках около 2/3 от разрушающей происходит структурно-фазовый переход третьего рода и коэффициент поперечной деформации снова приобретает положительные значения, быстро возрастает до 0,5 и больше, после чего происходит разрушение породы.
4. В ряде случаев перед разрушением возникает повторное уменьшение коэффициента поперечной деформации до отрицательных значений за счет полиморфных превращений.
5. Наличие отрицательного коэффициента поперечной деформации до порога дилатансии вызывает ряд вопросов по поводу величины коэффициента бокового распора в горном массиве.

Литература:

1. Берг О.Я. Некоторые физические обоснования теории прочности бетона. // Теория

6. расчета и конструирования железобетонных конструкций. - М.: Госстройиздат, 1958. - С. 14-22.
7. Зубов В.Г., Фирсова М.М. Об особенностях упругого поведения кварца в области α - β перехода. Кристаллография, 1962, т.7, № 3, с. 469-471.
2. Garber A.M. Pyrolytic materials for thermal protection systems. Aerospace Engng., 1963, v. 22, pp.126-137.
3. Clark S.K. The plane elastic characteristics of cord-rubber laminates. Textile Res. J., 1963, v. 33, pp. 295-313.
4. Акасака Т. Эластичные композиты. /Тканые конструкционные композиты / Пер с англ. под ред. Т.-В. Чу и Ф. Ко. М., Мир, 1991.- 432 с.
5. Choi J.B. Lakes R.S. Nonlinear analysis of the Poisson's ratio of negative Poisson's ratio foams. J. Composite Materials, 1995, v.29, № 1, pp. 113-128.
6. Choi J.B. Lakes R.S. Nonlinear properties of polymer cellular materials with a negative Poisson's ratio. J. Mater. Sci., 1992, v. 27, pp. 4678-4684.
8. Choi J.B. Lakes R.S. Nonlinear properties of metallic cellular materials with a negative Poisson's ratio J. Mater. Sci., 1992, v. 27, pp.5373-5381.
9. Caddock B.D., Evans K.E. Microporous materials with negative Poisson's ratios: I. Microstructure and mechanical properties. J. Phys. D: Appl. Phys. 1989, v. 22, pp. 1877-1882.
10. Evans K.E., Caddock B.D. Microporous materials with negative Poisson's ratios: II. Mechanisms and interpretation. J. Phys. D: Appl. Phys., 1989, v. 22, pp. 1883-1887.
11. Amir Y.-H., Weidner D.J., Parise J.B. Elasticity of α -cristobalite: a silicon dioxide with a negative Poisson's ratio. Science, 1992, v. 257, pp. 650-652.
12. Kimizuka H., Kaburaki H., Kogure Y. Mechanism for negative Poisson ratios over the a-b transition of cristobalite, SiO₂: a molecular-dynamics study. Phys. Rev. Lett. 2000, v. 84, № 24, pp. 5548-5551.
13. Alderson A., Evans K.E. Rotation and dilation deformation mechanisms for auxetic behaviour in the a-cristobalite tetrahedral framework structure. Phys. Chem. Minerals, 2001, v. 28, № 10, pp. 711-718.
14. Alderson A., Evans K. E. Molecular origin of auxetic behavior in tetrahedral framework silicates. Phys. Rev. Lett., 2002, v. 89, № 22, pp. 25503-25506.
15. Keskar N.R. Chelikowsky J.R. Negative Poisson ratios in crystalline SiO₂ from firstprinciple calculations. Nature, 1992, v. 358, pp. 222-224.
16. Keskar N.R. Chelikowsky J.R. Anomalous elastic behaviour in crystalline silica. Phys. Rev B. 1992, v. 48, № 22, pp. 16227-16233.
17. Lakes R. S. Advances in negative Poisson's ratio materials. Advanced Materials, 1993, v. 5, pp. 293-296.
18. Кулиев Г.Г. Определение коэффициента Пуассона в напряженных средах. ДАН РАН, 2000, т. 370, № 4, с.534-537.
19. Overaker D.W., Lagrana N.A., Cuitiño A.M. Finite element analysis of vertebral body mechanics with a nonlinear microstructural model for the trabecular core J. Biomech. Eng., 1999, v. 131, pp. 542-550.
20. Smirnov M.B., Mirgorodsky A.P. Lattice-dynamic study of the a-b pahse transition of quartz: soft mode behavior and elastic anomalies. Phys. Rev. Lett., 1997, v. 78, № 12, pp. 2413-2416.
21. Беломестных В.Н., Теслева Е.П. Коэффициент Пуассона и параметр Грюнайзена твердых тел. /Известия Томского политехнического университета, 2003.- Т.306.- №5.- С.8-12.
22. Куксенко В.С., Гузев М.А., Макаров В.В., Рассказов И.Ю. Концепция сильного сжатия горных пород и массивов. //Вести Дальневосточного государственного технического университета, 2011.-№3/4(8/9).- С.14-58.
23. Алексеев А.Д., Осыка Е.И., Тодосейчук А.Л. АС СССР №394692. БИ, 1973, №34.