

АУКСЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

А. Н. Рязанцев, Н. А. Рязанцев, А. К. Носач

Индустриальный институт ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, 85300, Украина. E-mail: rpm.kaf@ukr.net

Приведено исследование деформационных и упругих свойств горных пород в объемном поле сжимающих напряжений. Аналитический обзор литературных данных и лабораторные исследования образцов горных пород на установке неравнокомпонентного объемного сжатия. В работе приводятся экспериментальные данные, позволяющие утверждать, что горные породы, наряду с композитами, поропластами, веществами с полиморфизмом и др. являются классическими ауксетиками, в которых упругие модули и коэффициент поперечной деформации в процессе нагружения скачкообразно изменяются, принимая в том числе и отрицательные значения. Для описания свойств горных пород предлагается кусочно-линейная зависимость, а для определения квантованных деформаций, при которых упругие параметры меняются скачком, число Фидия. Упругие параметры являются не константами материала, а структурно-чувствительными характеристиками сопротивляемости деформированию и разрушению.

Ключевые слова: нагрузка, деформация, упругость, породы, ауксетики, квантование.

АУКСЕТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

А. М. Рязанцев, М. О. Рязанцев, О. К. Носач

Индустриальный институт ДВНЗ «Донецкий национальный технический университет»

пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна. E-mail: rpm.kaf@ukr.net

Наведено дослідження деформаційних і пружних властивостей гірських порід в об'ємному полі стискуючих напружень. Аналітичний огляд літературних даних свідчить про те, що думка про нелінійний зв'язок між навантаженням і деформаціями існує більше 300 років. Вже в середині ХХ століття було показано, що деформації і пружні модулі квантовані і не залежать від хімічної природи речовини. З виявленням матеріалів з від'ємним коефіцієнтом поперечної деформації впевненість в шматочно-лінійній пружності тільки зростає. Виявилось, що більшість матеріалів мають ауксетичні властивості, в яких пружні параметри не є константами матеріалу. В роботі наводяться експериментальні дані, які дозволяють стверджувати, що гірські породи разом з композитами, поропластами, речовинами з поліморфизмом та ін. є класичними ауксетиками. В них пружні модулі і коефіцієнт поперечної деформації в процесі навантаження змінюється стрибкоподібно, приймаючи в тому числі і від'ємні значення. Вугілля виявляє властивості класичного поропласту з коефіцієнтом поперечної деформації до «мінус» 8. Пісковики, в яких основним породоутворюючим мінералом є кварц, ведуть себе як класичні мінерали з поліморфизмом (коефіцієнт поперечної деформації до «мінус» 2), аргіліти і алевроліти як композити і мінерали з поліморфизмом (коефіцієнт поперечної деформації до «мінус» 0,5). Для опису властивостей гірських порід пропонується шматочно-лінійна залежність, при якій в характерних точках квантованих деформацій відбуваються електронні і структурно-фазові переходи другого роду з стрибкоподібною зміною пружних параметрів. Для визначення квантованих деформацій, при яких пружні параметри змінюються стрибком, пропонується число Фідія, головне і азимутальне квантові числа. Пружні параметри є не константами матеріалу, а структурно-чутливими характеристиками опору деформуванню та руйнуванню. Руйнування є локальний структурно-фазовий перехід першого або третього роду за рахунок паралельно-последовного ряду структурно-фазових переходів другого роду. При критичному переході третього роду руйнування йде із збільшенням об'єму, при переході першого роду – із зменшенням об'єму.

Ключові слова: навантаження, деформації, пружність, породи, ауксетики, квантування.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. При решении задач геомеханики большинство исследователей используют математический аппарат теории упругости. Убежденность в том, что упругие параметры являются константами материалов, настолько глубоко внедрена в сознание, что сомневаться в этом считается неприличным. Линейный закон изменения смещений от внешней нагрузки был предложен Р. Гуком в 1678 году, а в 1694 году Я. Бернулли, вопреки этому закону, предложил степенную зависимость:

$$\Delta l = aP^n, \quad (1)$$

где Δl – удлинение образца; P – продольное усилие; a и n – экспериментальные параметры.

Вся последующая история исследования и малых, и больших деформаций была историей периодического переоткрытия степенной зависимости Я. Бернулли, потому в научной литературе она имеет

имена разных ученых. Открытие в середине ХХ века материалов с отрицательным коэффициентом поперечной деформации вызвало очередную волну сомнений в правомочности применения линейной теории упругости для решения задач геомеханики. Для исследования закономерностей поведения горных пород и изучения связи деформаций с внешней нагрузкой в объемном поле сжимающих напряжений необходимо было проведение специальных экспериментов.

Детально результаты работ европейских научных школ, начиная с Р. Гука и до 60-х годов ХХ века, рассмотрены в монографии Дж. Ф. Белла [1], где показано, что уже в 1835 году стала очевидной нелинейность зависимости и больших, и малых деформаций от внешних нагрузок. В 1849 году Британская королевская комиссия по железу даже «отменила» закон Гука и предложила своим инженерам в расче-

тах пользоваться зависимостью в виде квадратичной параболы. В 1824-1844 г.г. И. Ходкинсон на экспериментах показал, что для дерева, железа, чугуна, камня зависимость не только нелинейная, но и что сама нелинейность при растяжении проявляется сильнее, чем при сжатии. Для реальных материалов коэффициент нелинейности изменяется от 0,02 до 0,7.

Несмотря на огромное количество экспериментальных и теоретических работ, подтверждающих нелинейный характер зависимости деформаций от нагрузки, единственным учебником для инженеров, основанном на нелинейной зависимости, является «Сопромат» Карла фон Баха, изданный в Германии на рубеже XIX и XX веков. В современном сопромате введено понятие о трех пределах в области малых деформаций (предел пропорциональности, предел упругости и предел текучести). При этом, за предел текучести была принята остаточная деформация 0,2%. Для целого ряда высокопрочных и хрупких материалов диаграмма является нелинейной на всем протяжении, потому было введено понятие «секущий модуль», который равен тангенсу угла наклона секущей, проведенной из начала диаграммы через точку предельной нагрузки, которая не имеет однозначности, а сам модуль теряет физический смысл. В экспериментальной механике деформируемого твердого тела показано, что, независимо от того удастся или не удастся наблюдать остаточные деформации, они существуют при любых малых деформациях (все зависит только от возможностей используемой измерительной аппаратуры).

Явление прерывистого деформирования известно еще с 1813 года. Ступенчатое (эффект Савара-Массона) и зубчатое (эффект Портвена-Ле Шетелье) изменение деформаций сегодня известны всем. Скачком изменяется остаточная деформация и в природных условиях (различного рода геодинамические явления). Но физический аспект этих явлений практически не изучен. В [2] была выдвинута концепция деформационных переходов, под которыми автор понимает перестройку структуры вещества. Вынужденный объемный переход при этом ассоциируется с пластическим течением, фронтальный переход – с прерывистым деформированием, а лавинный переход – с динамическими явлениями. Остаточная деформация, по мнению автора, возникает за счет изменения формы, а изменение объема остается упругим. Преобразование упругой деформации в остаточную возникает, когда амплитуда колебаний атомов и молекул достигает определенного предела. Понятия предельных напряжений, деформаций не имеют физического смысла.

Подытоживая сказанное выше, следует признать, что большой объем экспериментальных и теоретических исследований уже к середине XX века заставлял окончательно усомниться в правомочности применения линейной теории упругости при деформировании и разрушении материалов, особенно при объемном или сложном напряженном состоянии. Американским физиком Джеймсом Фредериком Беллом [1] было показано, что модуль сдвига материалов в процессе нагружения изменяется по зависимости:

$$G = G_0 \left(\frac{2}{3}\right)^{\ell/2+p/4}, \quad (2)$$

где $G_0 = 2,89 \cdot 10^5$ МПа – линейный модуль сдвига для изотропного твердого тела в нулевой точке; $\ell = 1, 2, 3, \dots$ – любое целое число; $p = 0$ или 1 – коэффициент структуры (0 – для монокристаллов, 1 – для поликристаллов).

Дискретный ряд сдвиговых деформаций, при которых модуль сдвига изменялся скачком, для всех испытанных поликристаллических твердых тел (в основном для 54-х металлов и сплавов) имел вид: $\gamma_N = 0,046; 0,127; 0,232; 0,350; 0,520; 0,780; 1,176; 1,765$ и описывался формулой

$$\gamma_N = \left(\frac{2}{3}\right)^{\ell/2+p/4}. \quad (3)$$

Получен также дискретный ряд восьми линейных осевых деформаций перехода

$$\varepsilon_N = \frac{\gamma_N}{m}, \quad (4)$$

где $m = 3,06$ – безразмерная константа, зависящая от отношения касательного напряжения в монокристалле к осевому напряжению в поликристалле.

Ряд линейных деформаций имеет вид: $\varepsilon_N = 0,015; 0,041; 0,076; 0,114; 0,171; 0,256; 0,385; 0,577$. Для деформаций кручения этот ряд выглядит следующим образом: $s_N = 0,026; 0,072; 0,132; 0,198; 0,294; 0,444; 0,667; 1,00$ и описывается формулой:

$$s_N = \frac{\gamma_N}{n}, \quad (5)$$

где $n = 1,765$ – коэффициент поликристалличности. При рассмотрении лишь активной части деформации (только при возрастании нагрузки)

$$\varepsilon_N \sigma = \gamma_N \tau = s_N S. \quad (6)$$

По традиции диаграммы «нагрузка-деформация» изображают в виде плавных кривых. Однако, как было установлено, пластическая деформация – это последовательный ряд структурных переходов в твердом теле. Изображение диаграмм гладкими предполагает, что этот ряд непрерывный. Квантование же модулей упругости по Дж.Ф. Беллу предполагает кусочно-линейную упругость, а форма диаграмм должна иметь вид ломаной кривой.

Новые данные, полученные во второй половине XX, начале XXI века, связанные с обнаружением веществ – ауксетиков, только укрепили эти предположения [3].

В 1948-1955 г.г. под руководством О.Я. Берга были проведены исследования на бетонных призмах и установлено, что при нагрузках 0,75 от разрушающих коэффициент поперечной деформации превышает 0,5 и достигает 0,75-0,76. Первые достоверные экспериментальные данные об отрицательных значениях коэффициента поперечной деформации в кристаллах кварца в области высоких температур опубликованы в 1962 году. Потом, в 1963 году А. Гарбер зарегистрировал отрицательные значения коэффициента поперечной деформации в модифицированном пиролитическом графите. Позже опи-

саны анизотропные армированные композиты с коэффициентом поперечной деформации $\nu \sim -2$.

Хотя, на первый взгляд, отрицательность коэффициента поперечной деформации противоречит здравому смыслу, возможность существования таких материалов подтверждается известным соотношением теории упругости:

$$\nu = (3K - 2G) / (6K + 2G), \quad (7)$$

где K и G – соответственно модули объемного сжатия и сдвига.

Из этого соотношения следует, что отрицательные значения коэффициента поперечной деформации возможны при условии $G > 3/2K$, когда модуль сдвига превышает модуль объемного сжатия больше, чем на 50%. Это возможно, когда материал при деформации сохраняет геометрические пропорции (форму), но изменяет свой объем. Понятно, что классическая теория упругости этого не допускает. Предполагается, что модуль объемного сжатия всегда больше модуля сдвига, а скорость продольной и объемной волн всегда больше скорости поперечной волны.

Вместе с тем, накопилось настолько большое количество экспериментальных данных об отрицательной величине коэффициента поперечной деформации, что игнорировать это явление стало невозможным. Детальный обзор о материалах с отрицательным коэффициентом поперечной деформации, которые названы ауксетиками, дан в [3].

Особое место среди ауксетиков занимают пороматериалы. Показано что с увеличением объемного сжатия коэффициент поперечной деформации уменьшается до $-0,7$. При больших сжимающих деформациях начинается процес схлопывания пор и ячеек, вызывая несоответствие между линейной теорией и экспериментальными данными.

Среди ауксетических пористых материалов следует выделить класс анизотропных пористых полимеров с размером пор меньше 150 мкм, выявленных К. Евансом. При относительной деформации образцов политетрафторэтилена (ПТФЭ) около 15% он получил $\nu \sim -12$. Как будет показано ниже, к классическим поропластам относятся и угольные пласты с ν до -8 .

Среди кристаллических веществ выделяют аксиально- и неаксиально-ауксетические монокристаллы. Аксиально-ауксетическими называют монокристаллы, в которых отрицательные значения коэффициента поперечной деформации наблюдаются вдоль кристаллографического направления $\langle 100 \rangle$. Неаксиально-ауксетическими называют моно-кристаллы, в которых отрицательные значения коэффициента поперечной деформации наблюдаются по другим направлениям, не совпадающим с $\langle 100 \rangle$. К аксиально-ауксетическим относятся монокристаллы ромбический фаз мышьяка и висмута, гексагональных фаз цинка, кадмия, бериллия [4]. Гранцентрированные кубические (ГЦК) и объемноцентрированные кубические (ОЦК) фазы простых металлов имеют обычно неаксиально-ауксетические свойства. Нужно отметить, что 67% кубических кристаллов таблицы Менделеева имеют отрицательный коэффициент поперечной деформации (литий – 0,54;

натрий – 0,44; калий – 0,42; кальций– 0,27; медь – 0,13 и т.д.) [5] и очень жаль, что эта информация замалчивается. В ауксетиках модули упругости в процессе нагружения изменяются в пять и более раз.

Ауксетическими свойствами обладают не только металлы и сплавы. Отрицательные значения коэффициента поперечной деформации обнаружены в более чем 10 полиморфных модификациях SiO_2 , в частности в тетрагональных монокристаллах кристобалита [6]. Как будет показано ниже, классическим ауксетиком являются песчаники, алевролиты, аргиллиты, основным породообразующим минералом которых является кварц. Есть сведения об ауксетических свойствах гранитов, кварцитов, порфиринов [7]. К ауксетикам относятся цеолиты [8], а также многокомпонентные системы, в которых отрицательные значения коэффициента поперечной деформации обусловлены не структурно-механическими особенностями строения материалов, а физико-химическими взаимодействиями и являются следствием фазовых переходов (гидрогели, жидкие кристаллы и др.) [9].

Для описания упругих свойств неупорядоченных систем с хаотичной структурой, к которым относятся композиты, горные породы, а также фазовых переходов, в настоящее время широко используют перколяционные модели. Показано, что если линейный размер перколяционной решетки $L < 0,2 \xi$ (где ξ – длина корреляции), то коэффициент поперечной деформации отрицательный, а если $0,2L > \xi$, то положительный. При $L/\xi \rightarrow \infty$ коэффициент поперечной деформации принимает граничное значение $0,08 \dots 0,04$ и не зависит от соотношения локальных упругих характеристик; при $L/\xi \rightarrow 0$ получаем $\nu = -1/3$, а при $L/\xi = 5$ $\nu = 0$. Для установления связи макроскопических упругих параметров среды со структурой материала была постулирована зависимость:

$$G/K = Z/8, \quad (8)$$

где Z – координационное число перколяционной решетки.

Для d - мерной изотропной среды формула имеет вид [10]:

$$\nu = (dK - 2G) / (d(d-1)K + 2G), \quad (9)$$

где d - интегральная размерность пространства.

Анализ этой формулы предусматривает, что во фрактальных средах при $Z < 4d$ коэффициент поперечной деформации должен быть положительным, при $Z = 4d$ – равен нулю, а при $Z > 4d$ – должен быть отрицательным.

В [11] для адекватного определения коэффициента поперечной деформации предлагается его связь с параметром Грюнайзена, который является мерой ангармонизма колебаний атомов и молекул твердых тел. Авторами получены следующие формулы:

$$\gamma = \frac{3(1+\nu)}{2(2-3\nu)}; \quad \nu = \frac{\frac{4}{3}\gamma-1}{2\gamma+1}, \quad (10)$$

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

Указанные зависимости свидетельствуют о том, что степень ангармонизма колебаний атомов в положении равновесия (γ) определяет механизм поперечной деформации (ν). При $1,29 \leq \gamma \leq 2,63$ имеем интервал значений коэффициента поперечной деформации $0,2 \leq \nu \leq 0,4$, что соответствует наиболее часто встречающимся экспериментальным величинам параметра Грюнайзена. При $\gamma = 0,75 \nu = 0$ (продольное сжатие не сопровождается поперечным растяжением). При $\gamma = 0 \nu = -1$ соответствует «гармоническому кристаллу» без затухания колебаний. Максимально возможное положительное значение $\nu = 0,67$ может быть достигнуто в условиях «неограниченного» ангармонизма $\gamma \rightarrow \infty$.

Таким образом, непостоянство упругих параметров твердых тел и наличие в них ауксетических свойств доказано и экспериментально и теоретически. В связи с этим, возникает необходимость детального изучения этих свойств в осадочных породах Донбасса в условиях неравнокомпонентного объемного сжатия.

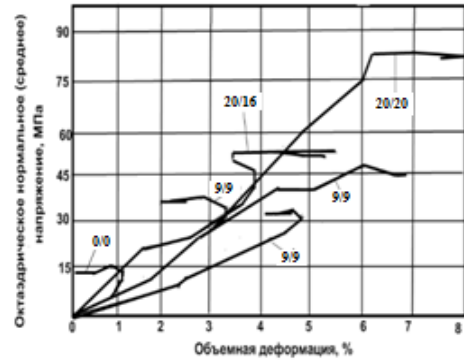
Целью работы является проведение лабораторных экспериментов на образцах осадочных пород Донбасса с детальным исследованием упругих характеристик в процессе нагружения.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для исследования характера изменения упругих характеристик в горных породах проведены испытания призматических образцов угля, аргиллитов, алевролитов и песчаников на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия конструкции ДонФТИ АН Украины при изменении внешней нагрузки ступенями 2 МПа. На рис. 1 показано изменение модуля объемного сжатия горных пород, как тангенса угла наклона диаграммы «среднее напряжение – объемная деформация». Аналогично на рис. 2 показано изменение модуля сдвига горных пород как тангенса угла наклона диаграммы «октаэдрическое касательное напряжение – октаэдрическая касательная (сдвиговая) деформация».

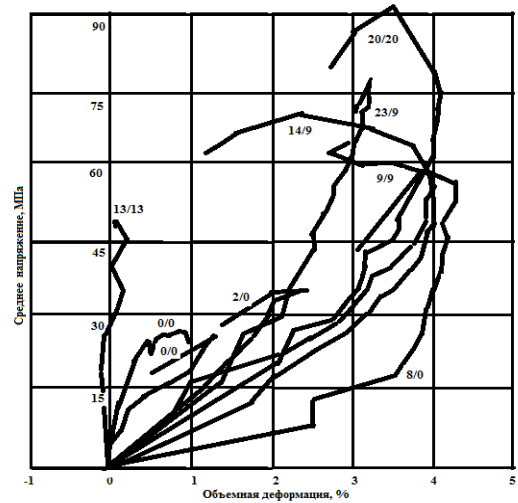
Приведенные диаграммы хорошо отражают изменения относительных деформаций в процессе нагружения. На них хорошо видны переломы со скачкообразным изменением модулей упругости, свидетельствующих о структурно-фазовых переходах в минералах, слагающих горные породы. На рис. 1 хорошо видны структурно-фазовые переходы первого и третьего рода. Переходы первого рода идут с уменьшением объема при постоянном давлении, а третьего рода (так называемые критические переходы) – с увеличением объема при нарастающем давлении. Интересно поведение некоторых образцов угля и аргиллита на рис. 1 а) и 1 б), когда видимая дилатансия (увеличение объема при структурно-фазовом переходе третьего рода) отсутствует. На самом деле на этих участках наблюдается знакопеременная объемная деформация практически при постоянном давлении. О структурно-фазовых переходах второго рода свидетельствуют скачкообразные изменения модуля всестороннего сжатия на рис. 1 и модуля сдвига на рис. 2.



а)

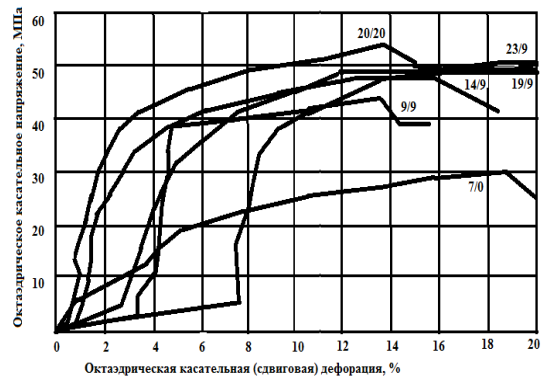


б)

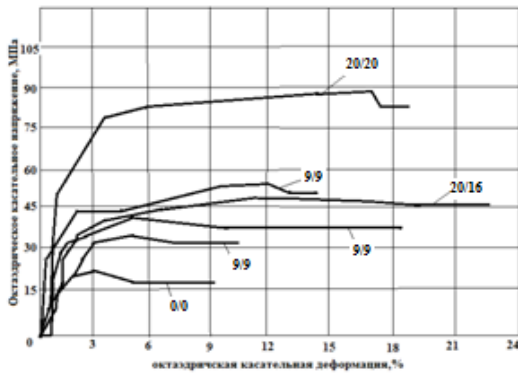


в)

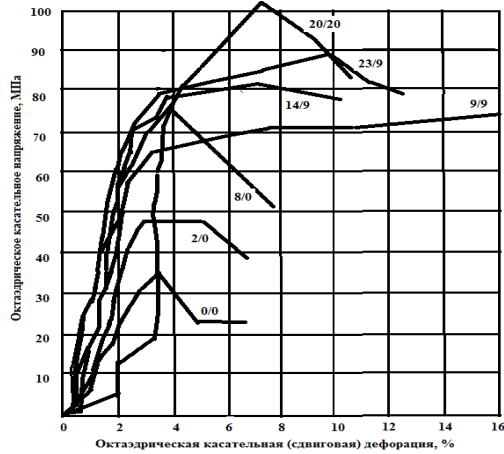
Рисунок 1 – Диаграммы «среднее напряжение – объемная деформация» для угля (а), аргиллита (б), песчаника (в) – через дробь показано соотношение промежуточного σ_2 и минимального σ_3 напряжений



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Диаграммы «октаэдрическое касательное напряжение – октаэдрическая касательная (сдвиговая) деформация» для угля (а), аргиллита (б), песчаника (в)

Рассмотрим более детально начальную и конечную стадии деформирования образцов. На начальной стадии деформирования объемная деформация в большинстве случаев идет с интенсивным уменьшением объема. Перемена знака деформаций наблюдается после достижения предела сжимаемости. Интенсивное уменьшение объема идет за счет уплотнения межслоевых расстояний в слоистых, ленточных и цепочечных силикатах, залечивания имеющихся пор и трещин, поэтому сдвиги не выражены и их величина не превышает 2% (рис. 3).

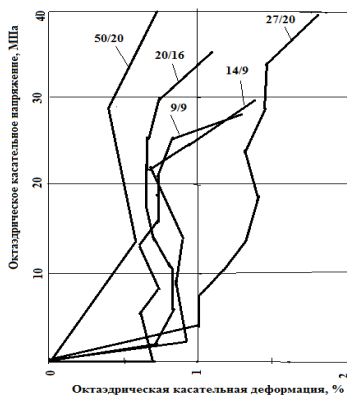
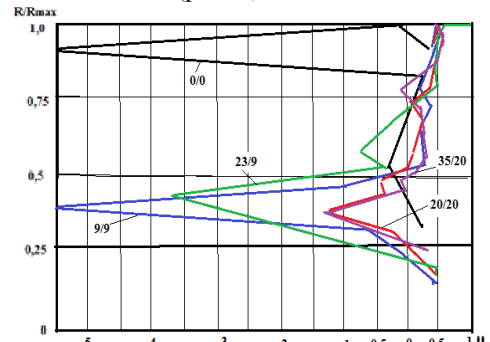
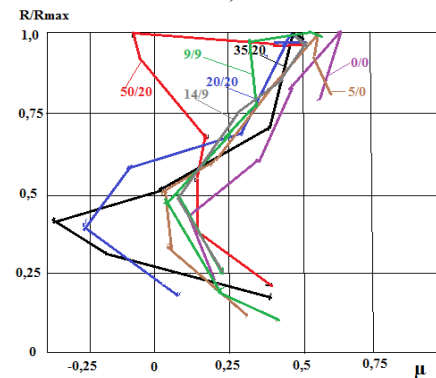


Рисунок 3 – Знакопеременная сдвиговая деформация в аргиллитах на начальной стадии деформирования

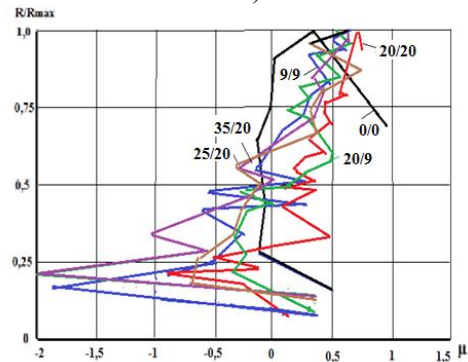
Поэтому на начальной стадии деформирования модуль сдвига больше модуля объемного сжатия и коэффициент поперечной деформации имеет отрицательные значения (рис. 4).



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Отрицательные значения коэффициента поперечной деформации в горных породах: а) – уголь; б) – аргиллит; в) – песчаник

После достижения порога дилатансии (предела сжимаемости), происходит структурно-фазовый переход третьего рода с (уменьшение объема сменяется увеличением). При этом модуль объемного сжатия претерпевает разрыв и меняет знак). Что касается сдвиговой деформации, то знакопеременная деформация наблюдается вначале деформирования (рис. 3), а после достижения предела сжимаемости (на предразрушающей стадии) она неуклонно нарастает (рис. 2). В момент перехода структура крайне разупорядочена, поэтому вероятность и интенсивность сдвигов резко возрастает, что приводит к пластическому течению и разрушению, либо, в начале, к структурно-фазовому переходу первого рода с уменьшением объема, а потом к изобарному пластическому течению.

Таким образом, упругие параметры горных пород и ряда других веществ не являются константами материалов, а являются их структурно-чувствительными характеристиками. Их скачкообразные изменения в процессе механического нагружения свидетельствуют о структурно-фазовых переходах второго рода. Отрицательные значения модуля объемного сжатия и коэффициента поперечной деформации больше 0,5 свидетельствуют о структурно-фазовом переходе третьего рода (уменьшение объема при сжатии сменяется его увеличением). Знакопеременные значения модуля сдвига и отрицательные значения коэффициента поперечной деформации свидетельствуют об отсутствии формоизменения (или очень большом сопротивлении сдвигу), а также о структурно-фазовом переходе первого рода (изобарном уменьшении объема).

На начальной стадии деформирования при нагрузках 0,1...0,2 от разрушающих коэффициент поперечной деформации горных пород положительный и колеблется в пределах 0,37-0,42. При дальнейшем нагружении он начинает уменьшаться, принимая в том числе и отрицательные значения. До предела сжимаемости (порога дилатансии) породы ведут себя как классические ауксетиками. На пределе сжимаемости при нагрузках 0,7-0,8 от разрушающих происходит структурно-фазовый переход третьего рода (с увеличением объема) либо первого рода (с уменьшением объема), коэффициент поперечной деформации снова приобретает положительные значения, быстро возрастает до 0,5 и больше, после чего наступает разрушение. В угольных пластах, как классических поропластах, после структурно-фазового перехода третьего рода сразу происходит схлопывание пор с уменьшением объема и уголь разрушается, потому отрицательные значения коэффициента поперечной деформации до - 8 могут наблюдаться непосредственно перед разрушением.

ВЫВОДЫ. Таким образом, осадочные горные породы являются классическими ауксетиками и ведут себя аналогично композитам, поропластам (уголь) или веществам с полиморфизмом (песчаник). Диаграмма «нагрузка- деформация» имеет вид кусочно-линейной кривой. Отрицательность коэффициента поперечной деформации в горных породах связана с ангармонизмом колебаний атомов и молекул, когда параметр Грюнайзена меньше 0,75, с фрактальностью горных пород, когда изменение объема возможно без изменения формы (порода ведет себя как конденсатор тепловой энергии). Характерно, что ряд дискретных деформаций, установленный Дж.Ф. Беллом, при которых происходят структурно-фазовые переходы второго рода со скачкообразным изменением модулей упругости, наблюдается и в горных породах. В связи с изменением деформационного состояния в процессе нагружения при объемном неравнокомпонентном сжатии, дискретный ряд деформаций является смешанным и представляет собой чередование нормальных, сдвиговых деформаций и деформаций кручения: 0,57; 1,1; 1,5; 2,4; 3,0; 3,7; 4,2; 4,9; 6,3; 7,9; 10,1; 11,2; 12,7; 13,7; 16,4; 20,9%. Однако этот ряд является единым и подчиня-

ется универсальному проявлению структурной гармонии – закону золотого сечения:

$$\gamma_N = \left(\frac{1}{\phi}\right)^{\ell/2+1/4}; \quad s_N = \Phi \left(\frac{1}{\phi}\right)^{\ell/2+1/4}; \\ \varepsilon_N = \Phi^2 \left(\frac{1}{\phi}\right)^{\ell/2+1/4}, \quad (11)$$

где $\Phi = 1,618$ – число Фидия (золотое число).

Деформирование и разрушение горных пород идет, в основном, за счет реализации сдвиговых и вихревых деформаций, линейные (объемные) разрушающие деформации оказываются очень большими и потому энергетически невыгодными.

В процессе деформирования горных пород в объемном поле сжимающих напряжений сообщаемая породе энергия изотермического и адиабатического сжатия (теплота) достигает критических значений, при которых происходят структурно-фазовые переходы 1-го, 2-го и 3-го рода, сопровождающиеся разрушением пород. При этом, сообщаемая породе теплота совершает работу по перемещению частиц разрушенной породы. При достижении скорости перемещения частиц скорости звука в среде возникает ударная волна и геодинамические явления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рязанцев А. Н. Структурно-фазовые переходы в горных породах и соответствие относительных деформаций на микро- и макроуровнях. Збірник наукових праць «Фізикотехнічні проблеми гірничого виробництва». Вип. 15. «Фізичні, геомеханічні та технологічні проблеми видобутку корисних копалин». Донецьк: Інститут фізики гірничих процесів НАН України, 2012. С.42-52.
2. Востриков Ю. Н. О формах и механизме образования остаточной деформации (концепция деформационных переходов и новая парадигма сейсмологии). Депонирована в ВИНТИ 21.04.11, № 189. Новосибирск, 2011. 286 с.
3. Конек Д. А., Войцеховски К. В., Плескачевский Ю. М., Шилько С. В. Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона (обзор): механика композитных материалов и конструкций. Москва, 2004. Том 10, № 1. С. 35-69.
4. Lubarda V. A., Meyers M. A. On the negative Poisson ratio in monocrystalline zinc. Scripta materialia, 1999, v. 40, № 8. pp. 975-977.
5. Гольдштейн Р. В., Городцов В. А., Лисовенко Д. С. Модуль Юнга кубических ауксетиков: письма о материалах. М.: ИПМим.А. Ю. Ишлинского РАН, 2011. Т.1. С. 127-132.
6. Kimizuka H., Kaburaki H., Kogure Y. Mechanism for negative Poisson ratios over the abtransition of cristobalite, SiO₂: a molecular dynamics study. Phys. Rev. Lett, 2000. V. 84, № 24. pp. 5548-5551.
7. Кулиев Г. Г. Определение коэффициента Пуассона в напряженных средах. ДАН РАН, 2000.т. 370, № 4. С. 534-537.
8. 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.
9. Smirnov M. B., Mirgorodsky A. P. Lattice-dynamic study of the a-b phase transition of quartz: soft

mode behavior and elastic anomalies. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, v. 78, № 12, pp. 2413-2416.

10. Wojciechowski K. W. Negative Poisson ratios at negative pressures. *Mol. Phys. Reports*, 1995, v. 10. pp. 129-136.

11. Беломестных В. Н., Теслева Е. П. Коэффициент Пуассона и параметр Грюнайзена твердых тел. *Известия Томского политехнического университета*. 2003. Т. 306. № 5. С. 8-12.

AUXETIC PROPERTIES OF ROCKS

A. Ryazantsev, N. Ryazantsev, A. Nosach

Industrial Institute "Donetsk National Technical University"

sq. Shibankova, 2, Pokrovsk, 85300, Ukraine. E-mail: rpm.kaf@ukr.net

The purpose. The study of the elastic parameters of the rocks involometric field of compressive stresses is the purpose of the article. **Methodology.** Analytical studies and laboratory experiments have been used. **The results.** It is found out that most materials have auxetic properties, in which the elastic parameters are not constants of the material. The paper presents experimental data which permit to confirm that the rocks, along with the composites, foam plastics, the substances with the polymorphism, etc., are classical auxetics. In the auxetics, the elastic modules and the coefficient of transverse deformation, in the process of the loading is changed abruptly, taking negative values as well. To describe the properties of the rocks, the piecewise-linear dependence is proposed, at which electronic and structural-phase transitions of the second kind with abrupt changes of the elastic parameters take place in characteristic points of the quantized deformations. To determine the quantized deformations in which the elastic parameters change abruptly, the number of Phidias, the principal and the azimuth quantum numbers are proposed to use. The elastic parameters are not the constants of the materials, but they are string-sensitive characteristics of the resistance to the deformation and the destruction. The destruction is local structural-phase transition of the first or third kind due to parallel-sequential series of structural-phase transitions of the second kind. In the case of critical transition of the third kind, the destruction proceeds with the increase of the volume, and during the transition of the first kind it proceeds with the decrease of the volume. **Originality.** It has been established that sedimentary rocks are classical auxetics. The elastic parameters are not the constants of the materials. To the threshold of the dilatancy (compressibility limit) the coefficient of transverse deformation is negative. **Practical value.** The negativity of the coefficient of transverse deformation leads to the conclusion about the absence of horizontal stress of solid rock massif but the variability of the elastic modules lead to the piecewise linear dependence of the deformations from the loading.

Key words: load, deformation, elasticity, rocks, auxetics, quantization.

REFERENCES

1. Ryazantsev, A. N. (2012), *Strukturno-fazovyie perehodyi v gornyih porodah i sootvetstvie otositelnyih deformatsiy na mikro- i makrourovnyah* [Structural phase transitions in rocks and correspondence of relative deformations at micro and macro levels], *Collection of scientific works "Physical and Technical Problems of Mining Production", "Physical, geomechanical and technological problems of mining of minerals"*, Donetsk: Institute of the Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, V. 15. pp. 42-52.

2. Vostrikov, Yu. N. (2011), *O formah i mehanizme obrazovaniya ostatochnoy deformatsii (kontseptsiya deformatsionnyih perehodov i novaya paradigma seysmologii)*. [On the forms and mechanism of the formation of residual deformation (the concept of deformation transitions and the new paradigm of seismology)], *VINITI* 21.04.11, №189. Novosibirsk. 286 p.

3. Konek, D. A., Voytsehovskiy, K. V., Pleskachevskiy, Yu. M., Shilko, S. V. (2004), *Materialy i otritsatelnyim koeffitsientom Puassona (obzor)*, [Materials with a negative Poisson's ratio (review)], *Mehanika kompozitnyih materialov i konstruksiy*, Moscow. Russia, Vol. 10, № 1, pp. 35-69.

4. Lubarda, V. A., Meyers, M. A. (1999), On the negative Poisson ratio in monocrystalline zinc, *Scripta materialia*, v. 40, № 8, pp. 975-977.

5. Goldshteyn, R. V., Gorodtsov, V. A., Lisovenko, D. S. (2011), *Modul Yunga kubicheskikh auksetikov*. [Jung modulus of cubic auxetiks], *Pisma o materialah*, Moscow: IPM im.A.Yu. Ishlinskogo RAN, vol. 1. pp. 127-132.

6. Kimizuka, H., Kaburaki, H., Kogure, Y. (2000), Mechanism for negative Poisson ratios over the abtransition of cristobalite, SiO₂: a molecular dynamics study, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, № 24, pp. 5548-5551.

7. Kuliev, G. G. (2000), *Oprealenie koeffitsienta Puassona v napryazhenyih sredah*, [Determination of Poisson's ratio in stressed environments], *DAN RAN*, vol. 370, № 4, pp. 534-537.

8. Overaker, D. W., Lagrana, N. A., Cuitiño, A. M. (1999), Finite element analysis of vertebral body mechanics with a nonlinear microstructural model for the trabecular core, *J. Biomech. Eng.*, vol. 131, pp. 542-550.

9. Smirnov, M. B., Mirgorodskiy, A. P. (1997), Lattice-dynamic study of the a-b pahse transition of quartz: soft mode behavior and elastic anomalies, *Phys. Rev. Lett.*, v. 78, № 12, pp. 2413-2416.

10. Wojciechowski, K. W. (1995), Negative Poisson ratios at negative pressures, *Mol. Phys. Reports*, vol. 10. pp. 129-136.

11. Belomestnyih, V. N., Tesleva, E. P. (2003), Koeffitsient Puassona i parametr Gryunayzena tverdyyih tel [Poisson's ratio and the Gruneisen parameter of solids], *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, vol. 306, № 5, pp. 8-12.

Стаття надійшла 31.01.2019.