

УДК 539.3: 552.1:53

А.Н. Рязанцев, Г.П. Стариков

РОТАЦИОННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

ИФГП НАН Украины, г. Донецк

Показано, что в процессе деформирования горных пород в условиях неравнокомпонентного сжатия вектор деформации поворачивается относительно вектора напряжения на угол до $\pm 60^\circ$. Изменение приращений объемной и сдвиговой деформаций является предвестником разрушения.

Ключевые слова: параметры Надаи–Лоде для напряжений и деформаций, угол Лоде, поворот вектора напряжений и деформаций, ротационные явления, приращение деформаций, предвестник разрушения

При испытании горных пород в объемном неравнокомпонентном поле сжимающих напряжений вид напряженного и деформационного состояний в образце принято характеризовать параметрами Надаи–Лоде [1] для напряжений

$$\mu_\sigma = \frac{2(\sigma_2 - \sigma_0) - (\sigma_1 - \sigma_0) - (\sigma_3 - \sigma_0)}{(\sigma_1 - \sigma_0) - (\sigma_3 - \sigma_0)} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

и деформаций

$$\mu_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}.$$

Направление действия октаэдрического касательного напряжения при этом определяется углом вида напряженного состояния (Лоде) φ_σ на октаэдрической площадке, которое совпадает с фазой напряженного состояния:

$$\varphi_\sigma = \text{arcctg} \frac{\mu_\sigma}{\sqrt{3}}.$$

Аналогично направление действия октаэдрической касательной деформации определяется углом вида деформационного состояния φ_ε , которое совпадает с фазой деформационного состояния:

$$\varphi_\varepsilon = \text{arcctg} \frac{\mu_\varepsilon}{\sqrt{3}}.$$

Угол Лоде при этом изменяется в пределах $\pm 30^\circ$.

По мнению большинства исследователей, деформационное состояние полностью соответствует напряженному, а параметры Надаи–Лоде для деформаций и напряжений равны между собой [1–3]. Однако деформационное и термодинамическое состояния твердого тела меняются не мгновенно, а определяются временем релаксации. Однозначная связь между напряженным и деформационным состояниями устанавливается лишь в случае обратимых процессов либо когда необратимый процесс достигает стадии стационарного течения [4]. Как показывают многочисленные испытания на установке неравнокомпонентного сжатия, даже при сравнительно небольших нагрузках горные породы не подчиняются закону линейного деформирования. Но даже для металлов и сплавов в случаях простого нагружения подобию девиаторов напряжений и деформаций нарушается ($\mu_\sigma \neq \mu_\epsilon$) [5–9]. В [8] установлено, что зависимость между параметрами деформационного и напряженного состояний подчиняется закону

$$\mu_\epsilon = \mu_\sigma - (\alpha + \beta K) \sin \pi \mu_\sigma,$$

где α, β – постоянные материала; $K = \sigma_0/\sigma_i$ – соотношение шарового тензора напряжений и тензора-девиатора.

В [7] установлено, что на деформирование материала оказывают влияние не только текущее значение параметра вида напряженного состояния, но и предыдущие его значения.

Цель настоящей работы – показать, что в процессе нагружения образцов горных пород на установке неравнокомпонентного сжатия вектор деформации поворачивается относительно вектора напряжений, т.е. сдвиговые деформации носят ротационный характер, а также, что характер изменения приращений деформаций может быть предвестником разрушения.

В [10] обнаружено, что в условиях неравнокомпонентного трехосного сжатия горных пород между напряженным и деформационным состояниями возникает большое несоответствие (рис. 1). При этом деформационное состояние может как опережать напряженное, так и отставать от него. В дефектных материалах, каковыми являются горные породы, при одноосном сжатии и при малых значениях шарового тензора напряжений в устьях существующих трещин превалирует термофлуктуационный процесс зарождения и распространения дефектов за счет того, что порода выступает в роли накопителя энергии, реализуются в основном линейные и объемные деформации, вектор сдвиговых деформаций отстает от вектора напряжений (сдвиг по фазе положительный). Деформационное состояние практически всегда соответствует области обобщенного растяжения. Именно эта особенность деформирования и разрушения горных пород при небольшой величине шарового тензора напряжений привела к возникновению мнения о том, что породы разрушаются отрывом [11].

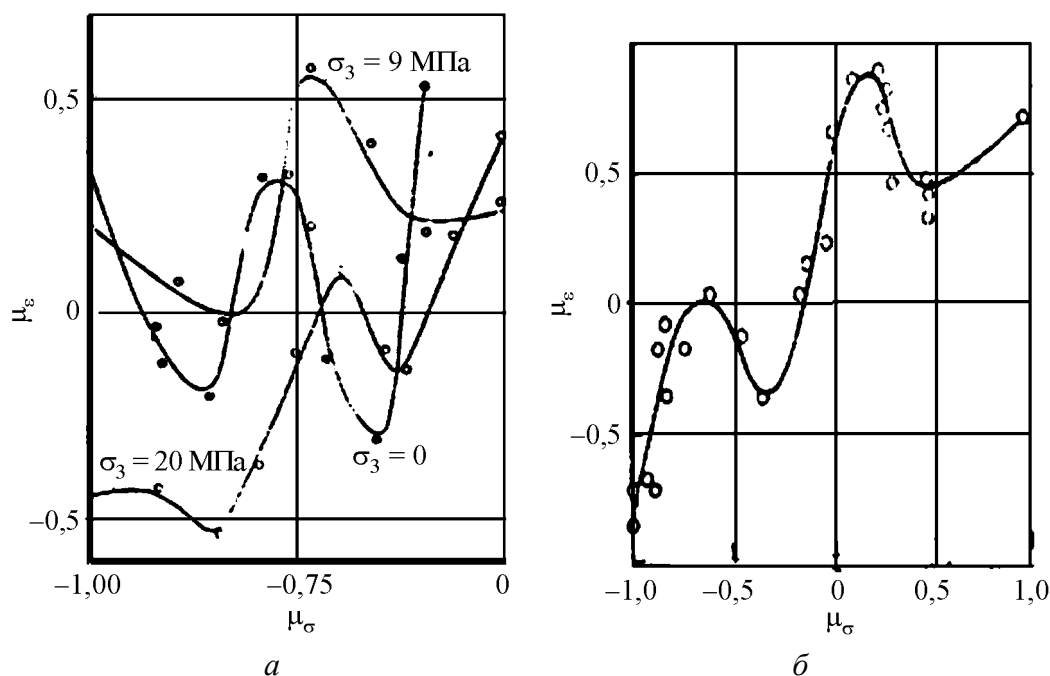


Рис. 1. Зависимость параметра деформационного состояния μ_ε от параметра напряженного состояния μ_σ для угля (а) при различных величинах минимального напряжения и для песчаника (б) при $\sigma_3 = 20$ МПа

При возрастании гидростатического давления первоначально существующие в горных породах трещины закрываются (залечиваются), межмолекулярные взаимодействия усиливаются, однородность поля деформаций внутри образца возрастает, а деформационное состояние все больше соответствует напряженному. В неравнокомпонентном поле сжимающих напряжений, с одной стороны, под действием шарового тензора напряжений сдерживаются процессы зарождения микротрещин и накопления объемных деформаций, а с другой – под действием девiatorа напряжений интенсифицируются ротационные моды сдвиговых деформаций, вектор сдвиговых деформаций начинает опережать вектор напряжений (сдвиг по фазе отрицательный).

В подтверждение сказанному на рис. 2 приведены диаграммы изменения угла между векторами напряженного и деформационного состояний ($\Delta\varphi$) при испытании горных пород на установке неравнокомпонентного сжатия конструкции ДонФТИ НАН Украины. Хорошо видно, что при одноосном сжатии (рис. 2,а) вектор деформации поворачивается в одном направлении, все больше опережая вектор напряжений. С увеличением шарового тензора и неравнокомпонентности поля напряжений поворот вектора деформаций принимает знакопеременный характер (рис. 2,б–д), что свидетельствует о наличии двух противоположных механизмов деформирования. Вначале нагружения деформирование образцов идет в основном за счет изменения объема, величина сдвиговых деформаций незначительна, и форма образца не меняется. Работа внешних сил по изменению объема образца запасается в образце в виде тепла. После накопления определенного его количества активизируются сдвиговые деформации и изменяется форма образца.

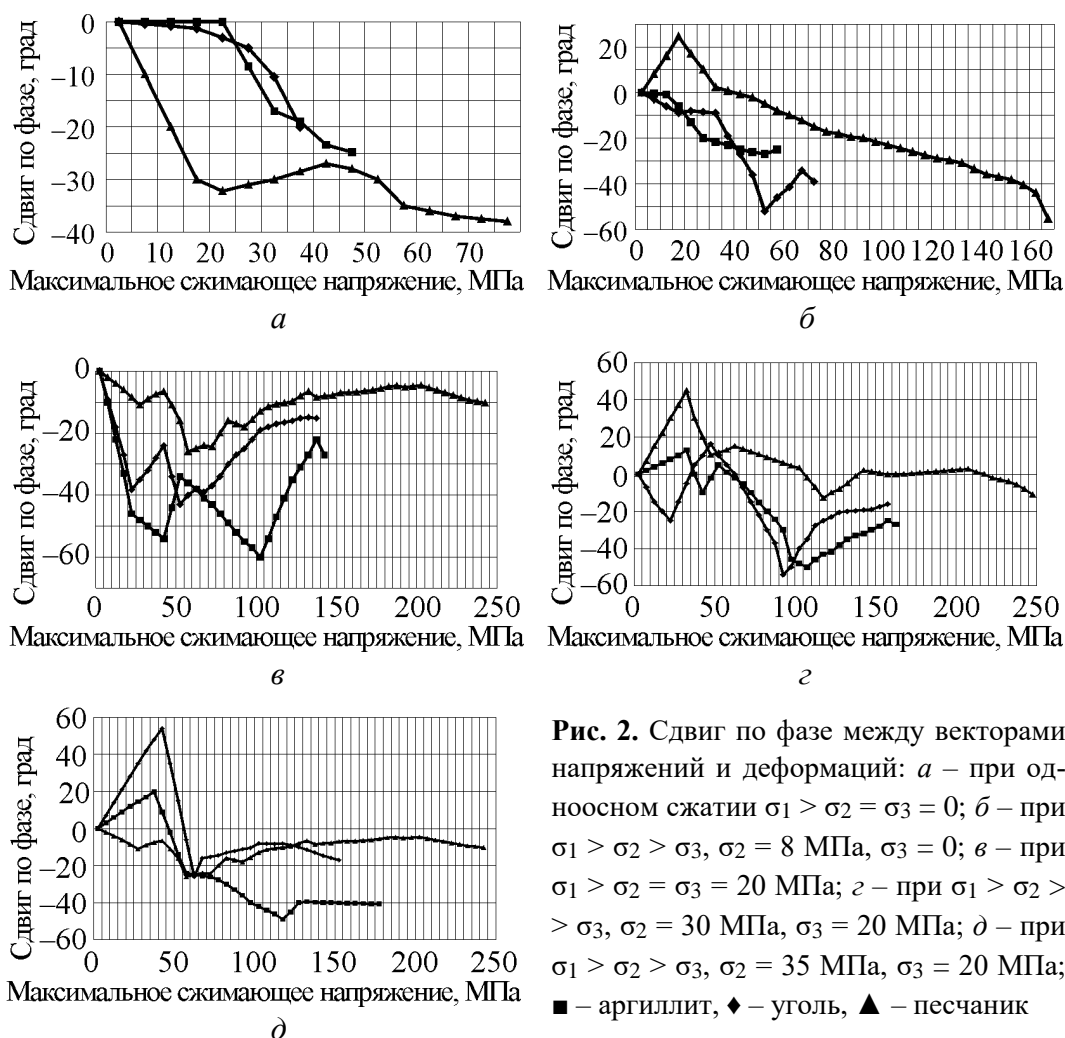


Рис. 2. Сдвиг по фазе между векторами напряжений и деформаций: *а* – при одноосном сжатии $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$; *б* – при $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, $\sigma_2 = 8$ МПа, $\sigma_3 = 0$; *в* – при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20$ МПа; *г* – при $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, $\sigma_2 = 30$ МПа, $\sigma_3 = 20$ МПа; \blacksquare – аргиллит, \blacklozenge – уголь, \blacktriangle – песчаник

Периоды накопления энергии (уменьшения объема образца) и ее диссипации (активизации сдвиговой деформации) хорошо видны на диаграммах изменения приращений деформаций в процессе нагружения (рис. 3). С увеличением нагрузки амплитуда изменения объемной деформации затухает, на пороге дилатансии меняет знак, в это время резко возрастает сдвиговая деформация (долгосрочный предвестник разрушения), а перед самым разрушением часто наблюдается повторная инверсия объемной и сдвиговой деформации (кратковременный предвестник разрушения).

Аналогично ведут себя и приращения плотности энергии изменения объема и энергии формоизменения для тех же образцов (рис. 4). Плотность энергии изменения объема A_v и энергии изменения формы A_f определяли, исходя из кусочно-линейной интерпретации диаграмм нагрузка–деформация, по формулам

$$A_v = \frac{1}{2K} \sigma_{cp}^2, \quad A_f = \frac{2}{4G} \tau_i^2,$$

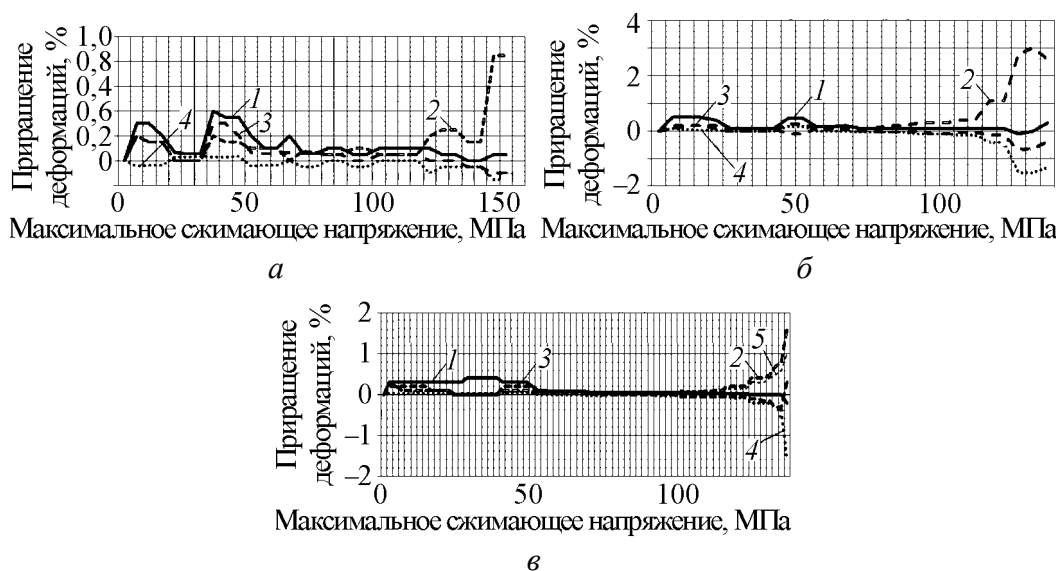


Рис. 3. Изменения приращения объемной и сдвиговой деформаций на октаэдрической площадке в процессе разрушения песчаника (а), угля (б) и аргиллита (в); 1 – приращение объемной деформации, 2 – приращение сдвиговой деформации, 3 – приращение энергии изменения объема, 4 – приращение энергии изменения формы, 5 – плотность энергии изменения объема

где K и G – соответственно модуль объемного сжатия и модуль сдвига, не являющиеся константами материала, а изменяющиеся скачкообразно в процессе нагружения; $\sigma_{\text{ср}}$ – среднее, или октаэдрическое нормальное напряжение (шаровой тензор); τ_i – октаэдрическое касательное напряжение,

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3},$$

$$\tau_i = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

Характерно, что до предела сжимаемости (порога дилатансии) плотность энергии формоизменения меньше плотности энергии изменения объема. На пороге дилатансии энергия формоизменения сравнивается с энергией изменения объема и начинает интенсивно расти.

Следует также отметить, что степень изменения плотности энергии объема и формы может быть кратковременным предвестником (или критерием) разрушения. Однако более достоверным критерием этого процесса могут служить аномальное поведение приращений плотности энергий перед самым разрушением и аномальное поведение приращений деформаций. В частности, критерием разрушения является повторная инверсия приращения деформаций или приращения плотности энергий. Приращения плотности энергии изменения объема и формы, а также приращения объемной и сдвиговой деформаций после уменьшения перед самым разрушением начинают снова возрастать.

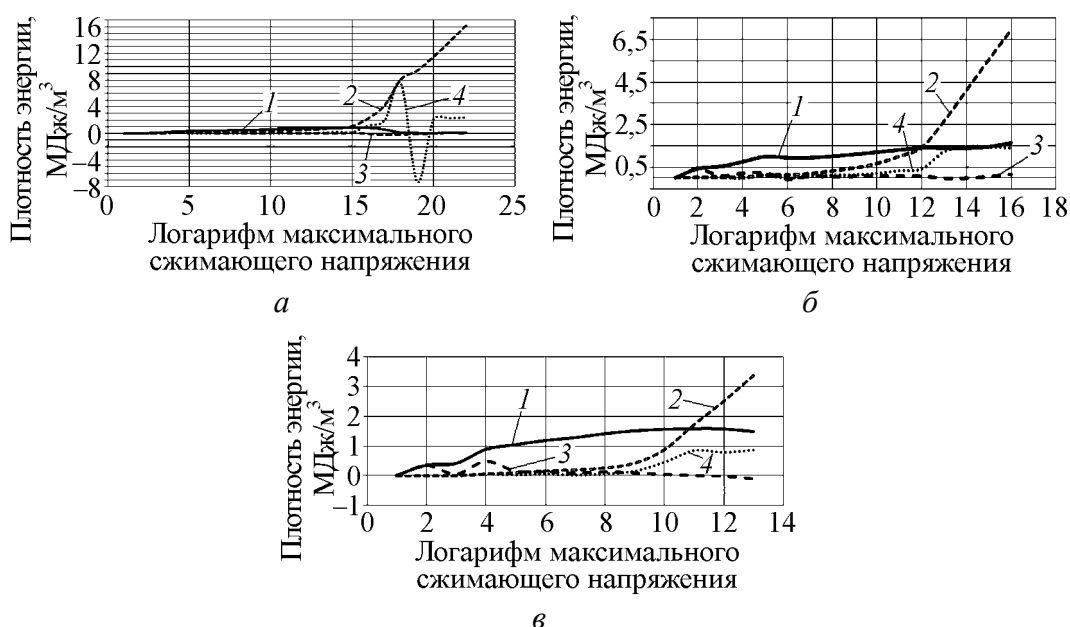


Рис. 4. Поведение плотности энергии изменения объема и формы в процессе нагружения песчаника (а), угля (б) и аргиллита (в); 1, 2 – плотность энергии изменения соответственно объема и формы, 3, 4 – приращение энергии изменения соответственно объема и формы

С точки зрения практического применения предпочтение следует отдать деформационным предвестникам, поскольку энергию измерить невозможно, ее можно только рассчитать. Разработка способа прогноза разрушения горных пород с учетом указанных закономерностей – материал для дальнейших исследований.

Выводы. При деформировании и разрушении горных пород в объемном поле сжимающих напряжений вектор деформации поворачивается относительно вектора напряжений. Поворот носит знакопеременный характер, что свидетельствует о наличии двух противоположных механизмов деформирования, один из которых связан с изменением объема и накоплением энергии, другой – с интенсификацией сдвиговых деформаций и изменением формы. Достижение порога дилатансии (приращение объемной деформации и плотности изменения формы проходит через нуль и меняет знак, а приращение сдвиговой деформации резко возрастает) может быть долгосрочным предвестником разрушения. Повторная инверсия приращений деформаций и плотности изменения энергий наблюдается перед самым разрушением и может быть кратковременным предвестником (или критерием) разрушения.

1. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – М.: Изд-во иностр. лит., 1954. – 647 с.
2. Илюшин А.А. Пластичность / А.А. Илюшин. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 272 с.
3. Ленский В.С. Экспериментальная проверка основных постулатов общей теории упруго-пластических деформаций / В.С. Ленский // Вопросы теории пластичности. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 58–82.

4. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел / В.В. Федоров. – Ташкент: Фан, 1979. – 168 с.
5. Lode W. Versuche über den Einfluß der mittleren Hauptspannung auf das Fließen der Metalle Eisen, Kupfer und Nickel / W. Lode // Z. Phys. – 1926. – 36, N8. – S. 913–939.
6. Taulor G. The plastic distortion of metals / G. Taulor, H. Quinney // Phil. Trans. Roy. Soc. A. – London. – 1931. – 230, № 2. – С. 323–362.
7. Елсуфьев С.А. О пластическом деформировании при сложном нагружении / С.А. Елсуфьев // Тр. Ленингр. политехн. ин-та. – 1967. – №278. – С. 29–31.
8. Ягн Ю.И. Влияние поворота главных осей напряжений на сопротивление металлов пластическому деформированию и разрушению / Ю.И. Ягн, Л.В. Гребнев // Тр. Ленингр. политехн. ин-та. – 1967. – № 278. – С. 66–69.
9. Жуков А.М. Некоторые особенности поведения металлов при упруго–пластическом деформировании / А.М. Жуков // Вопросы теории пластичности. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 30–57.
10. Алексеев А.Д. Напряженное и деформационное состояния в горных породах при неравнокомпонентном сжатии. / А.Д. Алексеев, Н.А. Рязанцев // Физика и техника высоких давлений. – 1988. – Вып. 28. – С. 35–39.
11. Оди́нцев В.Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород / В.Н. Оди́нцев. – М.: ИПКОН РАН, 1996. – 166 с.

А.М. Рязанцев, Г.П. Стариков

РОТАЦІЙНІ ДЕФОРМАЦІЇ У ГІРСЬКИХ ПОРОДАХ

Показано, що в процесі деформування гірських порід в умовах нерівнокомпонентного стискування вектор деформації повертається відносно вектору напруження на кут до $\pm 60^\circ$. Зміни приросту об'ємної і зсувної деформацій є передвісником руйнування.

Ключові слова: параметри Надаї–Лоде для напружень і деформацій, кут Лоде, поворот вектору напружень і деформацій, ротаційні явища, приріст деформацій, передвісник руйнування

A.N. Ryazantsev, G.P. Starikov

ROTARY DEFORMATIONS IN MINE ROCK

It is shown, that in process of mine rocks deformation under the conditions of true triaxial compression, deformation vector turns relatively to stress vector by the angle of $\pm 60^\circ$. Variation augmentations of the volume and dislocation deformation are forerunner destructions.

Keywords: Nadai–Lode parameters for stresses and deformations, Lode angle, turn of stresses and deformations vector, rotary phenomena, augmentation deformations, forerunner destructions