

контролировать состояние рудничной атмосферы в реальном времени, значительно расширяет возможности вентиляции шахты. Рациональное и обоснованное резервирование воздуха в условиях оперативного управления проветриванием газовых шахт позволяет повысить производительность добычного оборудования по газовому фактору уменьшить расходы электроэнергии на вентиляцию при существенном повышении безопасности ведения горных работ.

Список используемой литературы:

1. Пучков Л.А., Каледина Н.О. Динамика метана в выработанных пространствах угольных шахт. - М.: Издательство Московского государственного университета. 1995, 313с.
2. Калёбанов Ф.С. Аэродинамическое управление газовым режимом в шахтных вентиляционных сетях. – М.: Наука, 1974. – 135с.
3. Аюров В.Д. Колебания концентрации метана в исходящих струях выемочных участков. – В сб. Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. М.: ЦНИЭИуголь, 1980, №10. – С.9-10.

УДК 519.2:537.32

РЯЗАНЦЕВ М.О., РЯЗАНЦЕВ А.М. (КП ДонНТУ)

**ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗВИТКУ РОТАЦІЙНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ
РУЙНУВАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

Розглянуто результати випробувань гірських порід на установці нерівнокомпонентного об'ємного стискання з точки зору механіки твердого тіла, термодинаміки і електродинаміки. Вказано на аналогію деформаційних і електродинамічних процесів в гірських породах. Показано, що основним механізмом деформації є ротація.

При випробуванні гірських порід в об'ємному нерівнокомпонентному полі стискаючих напружень вид напруженого и деформаційного стану в зразку прийнято характеризувати параметрами Надаі-Лоде [1] для напружень μ_σ і деформацій μ_ε . Напрямок дії октаедричного дотичного напруження при цьому визначається кутом виду напруженого стану (Лоде) φ_σ на октаедричній площинці, який співпадає з фазою напруженого стану.

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

Аналогічно напрямок дії октаедричної дотичної деформації визначається кутом виду деформаційного стану φ_ε , який співпадає з фазою деформаційного стану.

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

Кут Лоде при цьому змінюється в межах $\pm 30^\circ$.

Режими навантаження гірських порід можуть бути різними. Найчастіше використовується режим заданих напружень, коли зовнішні навантаження фіксуються (завдаються), а деформації реєструються, як реакція на навантаження. Найпростішими випробуваннями в даному режимі є випробування на одноосне стискання, коли боковий тиск дорівнює атмосферному, на узагальнене стискання, коли боковий тиск завдається постійним, але не рівним нулю, і на узагальнене розтягування, коли максимальне і проміжне напруження однакові і більше мінімального. Такі схеми навантаження приваблюють тим, що на протязі всього процесу навантаження від 0 до руйнування вид напруженого стану залишається постійним: $\mu_\sigma = -1$ при

узагальненому стисканні і $\mu_G = 1$ при узагальненому розтягуванні. Відповідно кут напруженого стану також є постійним і складає $\varphi_G = -30^\circ$ або $\varphi_G = 30^\circ$.

Раніше в [2] було показано, що в умовах нерівнокомпонентного трьохосового стискання гірських порід між напруженим і деформаційним станом виникає велика невідповідність. При цьому деформаційний стан може як випереджати напружений, так і відставати від нього. Для наочності на рис.1-3 наведені діаграми зміни кута між вектором напруженого і деформаційного стану ($\Delta\varphi$) при випробуваннях гірських порід на установці нерівнокомпонентного стискання конструкції ДонФТІ НАН України. Добре видно, що при одноосному стисканні вектор деформації повертається в одному напрямку все більше випереджаючи вектор напружень, наближаючись до узагальненого зсуву і переходячи в пісковику, навіть, в зону узагальненого розтягування. Із збільшенням кульового тензору, поворот вектору деформацій приймає знакоперемінний характер, що свідчить про наявність двох протилежних механізмів деформування.

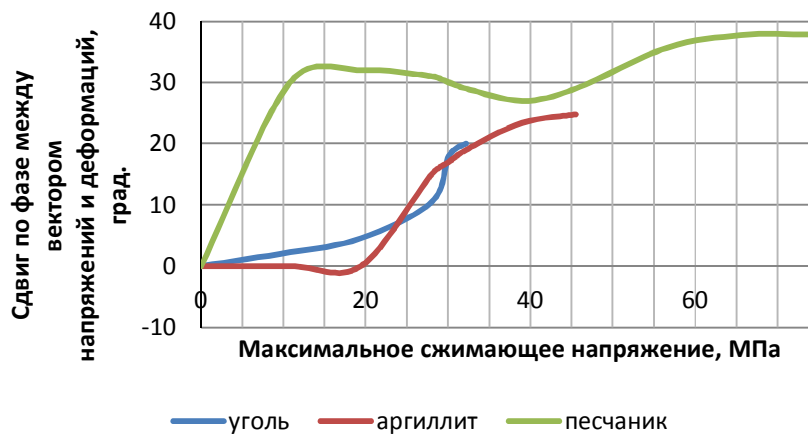


Рисунок 1 – Зсув по фазі між напруженим і деформаційним станом в зразках порід в процесі навантаження при узагальненому стисканні $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ (одноосне стискання)

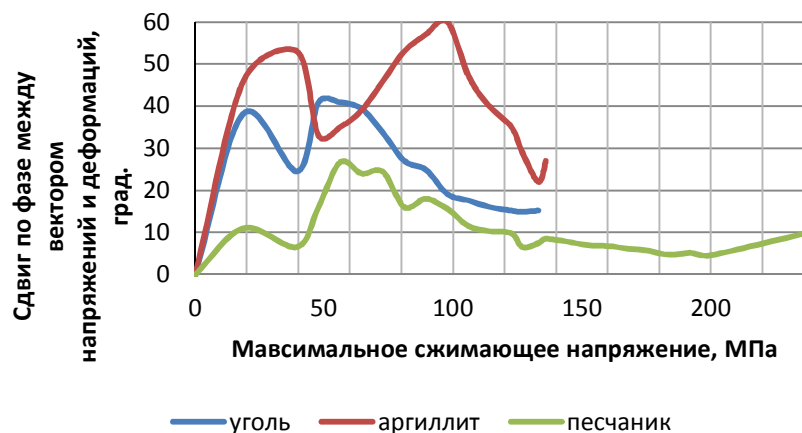


Рисунок 2 – Зсув по фазі між напруженим і деформаційним станом в зразках порід в процесі навантаження при узагальненому стисканні $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20$ МПа



Рисунок 3 – Зсув по фазі між напруженим і деформаційним станом в зразку вугілля в процесі навантаження при узагальненому розтяжінні $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 = 22$ МПа

Вектор деформації переходить в зону узагальненого розтягування, потім поступово переходить знову в зону стискування. Перед самим руйнуванням знову спостерігається збільшення зсуву по фазі між вектором напружень і деформацій. При узагальненому розтягуванні вектор деформації дуже відстає від вектору деформації і знаходиться в області стискування і в процесі деформації наближається до області узагальненого зсуву. Таким чином, механізм розтягування в об'ємному полі стискаючих напружень енергетично не вигідний. Саме тому в пісковиках і алевролітах здійснити руйнування зразків при такому напруженому стані в межах можливості УНТС не вдається.

На разі наукою встановлено [3], що будь-який механічний вплив на гірську породу викликає розповсюдження в ній деформаційної хвилі. Структура будь-якого хвильового поля повздовжно-поперечна. При цьому поперечна складова деформаційної хвилі в часі зсунута по фазі на 90° . Потенційно-кінетична часова хвиля має вид

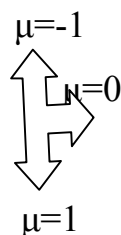
$$T(\omega t) = \cos \omega t + i \sin \omega t ;$$

Поле деформацій у загальному випадку має комплексний характер, при цьому активна або реальна складова поля – повздовжні хвилі, а уявна – поперечні.

По аналогії було б доцільно напрямком розповсюдження деформаційної хвилі в просторі також характеризувати кутом, який змінюється в межах $\pm 90^\circ$. Тому кут напруженого і деформаційного станів, який віддзеркалює напрямком дотичних напружень і деформацій, доцільно представити відповідно у вигляді:

$$\varphi_\sigma = \arcsin \mu_\sigma ; \quad \varphi_\varepsilon = \arcsin \mu_\varepsilon ;$$

В цьому випадку кут вектору напруженого стану буде змінюватись в межах $\pm 90^\circ$ (при узагальненому стискуванні – 90° , при узагальненому зсуві 0° , при узагальненому розтягуванні 90°).



В цьому випадку відставання вектору деформацій на 90° буде свідчити про поведінку породи як накопичувача енергії, спостерігається абсолютна в'язкість,

відсутність зсувних деформацій (конденсаторні властивості), випередження на 90^0 – як індуктора (розвиваються вихорові, ротаційні деформації), якщо вектор напружень і деформацій співпадають відбувається дислокаційна течія (чистий зсув).

Розглянемо зсув вектору деформацій відносно вектору напружень в зразках вугілля при $\mu\sigma = -1; 0$ і 1 при такій інтерпретації кутів напруженого і деформаційного станів (рис.4). Як видно з діаграм рис.4 деформаційний стан, незалежно від напруженого стану, складається таким чином, що вектор деформації завжди лежить між стисканням і зсувом. В процесі навантаження вектор деформації повертається відносно вектора напружень. При узагальненому стисканні зсув між векторами напружень і деформацій на початковій стадії навантаження досягає 110^0 і зменшується перед руйнуванням до 60^0 (загальний кут повороту вектору деформацій 50^0). При узагальненому зсуві на початковій стадії навантаження зсув досягає 60^0 , а перед руйнуванням зменшується до 10^0 (загальний кут повороту також 50^0). При цьому і при стисканні, і при зсуві вектор деформації випереджає вектор напружень. При узагальненому розтягуванні зсув вектору деформації відносно вектору напружень досягає -150^0 , а перед руйнуванням зменшується до -100^0 (загальний кут повороту також 50^0), але вектор деформації відстає від вектору напруженого стану. Виникає враження, що ситуація, коли вектор деформацій співпадає з вектором напружень в природі заборонена (трансляційний зсув відсутній). Те, що ми вважаємо за зсувні деформації, насправді є ротаційними деформаціями з кутом повороту до 50^0 . Складається враження, що кут повороту 50^0 є критичним, при його досягненні зразок руйнується.

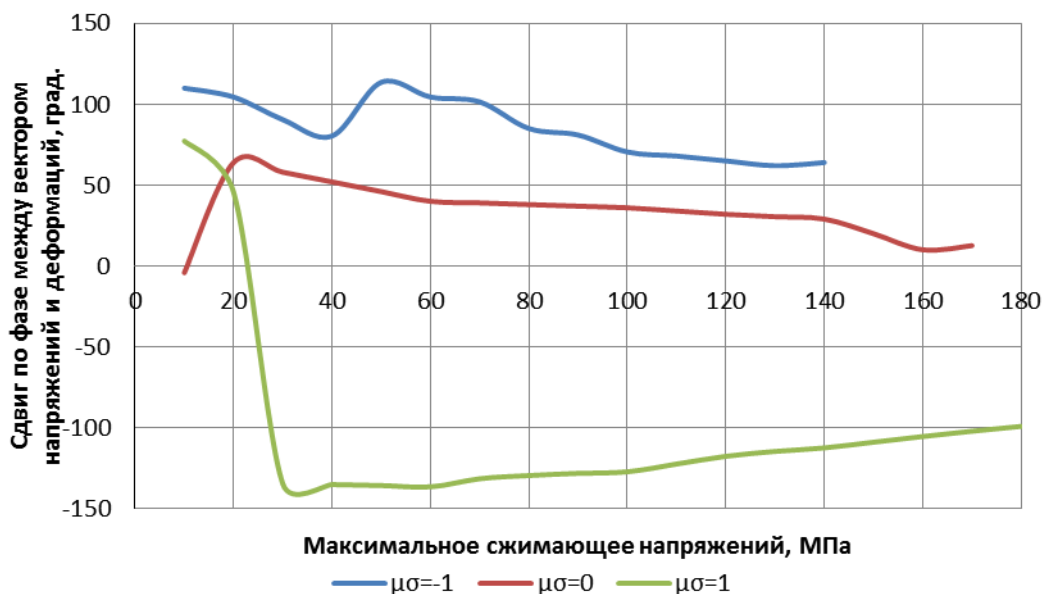


Рисунок 4 – Зсув по фазі між вектором напружень і деформацій у зразках вугілля при різних видах напруженого стану

Якщо навести аналогію з електромагнітними коливаннями, то в часі магнітна складова також зсунута по фазі на 90^0 , а в просторі зсув по фазі між активною і реактивними (удаваними) складовими електромагнітного поля теоретично може досягати $\pm 90^0$. Фактично, в залежності від властивостей речовини, завжди існує зсув по фазі між вектором напружень і током. Якщо ток відстає від вектору напружень, в речовині превалюють ємнісні властивості (енергія накопичується), якщо ток випереджає вектор напружень, превалюють індукційні властивості (кругові або

вихорові токи). Відставання вектору деформацій від вектору напружень в породах також може свідчити про накопичення енергії, а випередження вектору деформацій може свідчити про пряме перетворення енергії навантажувальної системи в енергію ротаційних деформацій.

Згідно з законами термодинаміки, накопичення механічної енергії в системі відбувається шляхом перетворення її в тепло [4]. Але теплові хвилі це ті ж електромагнітні хвилі тільки в інфрачервоному діапазоні.

Таким чином, якщо напружений стан сприяє розвитку ротаційних деформацій (узагальнене стискання, узагальнений зсув і проміжні напружені стани), йде пряме перетворення механічної енергії навантажувальної системи і кінетичну енергію ротаційних деформацій. Якщо напружений стан не сприяє розвитку ротаційних деформацій (узагальнене розтягування і близькі до нього напружені стани), спочатку в зразку йде накопичення механічної енергії навантажувальної системи у вигляді електромагнітної (теплової) енергії, а потім (після досягнення певної межі) також активізуються ротаційні деформації.

Накопичення енергії звичайно пов'язують із зміною об'єму. З таблиці 1 видно, що при узагальненому стисканні накопичена енергія вдвічі менша ніж при узагальненому розтягуванні, лівова доля підведеної енергії перетворюється на енергію зміни форми і процес руйнування йде паралельно з деформуванням. При узагальненому розтягуванні, навпаки, форма змінюється мало, а роботу безпосередньо по руйнуванню виконує накопичена енергія. При цьому накопичена енергія перевищує теплоємність вугілля. При узагальненому стисканні у вугіллі превалюють властивості провідника і підведена енергія безпосередньо йде на кінетичну енергію переміщення вугільних часток. При узагальненому розтягуванні превалюють властивості конденсатора-накопичувача, і перехід в кінетичну енергію часток відбувається тільки по досягненню теплоємності.

В таблиці 1 наведені дані також для напруженого стану близького до узагальненого зсуву (строка 2). Характерно, що при такому напруженому стані у вугіллі виявляються також більше ємнісні властивості. Аналогічні закономірності спостерігаються і в інших гірських породах.

Висновки.

1. Основним механізмом деформування гірських порід в об'ємному полі стискаючих напружень є ротація (вихороутворення).

2. Найбільш сприятливими напруженими станами для розвитку ротаційних (зсувних) деформацій є область між узагальненим стисканням і зсувом. При цьому породи виявляють властивості провідника і енергія навантажувальної системи, в основному, витрачається безпосередньо на переміщення часток порід.

3. При напружених станах між узагальненим розтягуванням і зсувом виявляються більше ємнісні властивості породи, енергія навантажувальної системи накопичується в породах у вигляді електромагнітної (теплової) енергії і при досягненні величини теплоємності відбувається інтенсифікація ротаційних деформацій і руйнування порід.

4. Максимальний кут повороту вектору деформації відносно вектору напружень при ротації, незалежно від виду напруженого стану, складає 50° .

Таблиця 1 – Енергоємність деформування і руйнування вугілля в об'ємному полі стискаючих напружень (щільність - 1350кг/м³, питома теплоємність 1,2 кДж/кгК)

№ п\п	Компоненти поля напружень σ_1 : σ_2 : σ_3	Об'єм зразка, см ³		Зміна об'єму		Щільність енергії зміни об'єму на межі стискання/руйнування, МДж/м ³	Щільність енергії зміни форми на межі стискання/руйнування, МДж/м ³	Підведена енергія, кДж/кг <u>повна</u> в т.ч. накопичена
		первісний	На межі стискання	абс., см ³	відн.			
1	133:20:20	167,8	158,15	9,65	0,057	1,23	5,71	5,14/0,91
2	170:85:7,5	125	108,78	17,22	0,1298	2,53	0,19	2,01/1,87
3	180:180:22	125	117,73	7,27	0,0582	1,97/191	0,35/0,4	2,32/1,46

Література:

1. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Изд-во иностр. лит., 1954.- 647с.
2. Алексеев А.Д., Рязанцев Н.А. Напряженное и деформационное состояния в горных породах при неравнокомпонентном сжатии. – Физика и техника высоких давлений, 1988, вып.28 С.35-39.
3. Гликман А.Г. О формировании упругих колебаний в слоистых средах. //Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений.- 1999.-№6.- С.25-29.
4. Базаров И.П. Термодинамика. М.: Высшая школа, 1991.-376с.