

УДК 534.1: 539.375

doi: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-72-82>

М.О. Рязанцев

О.К. Носач

А.М. Рязанцев

ГІРСЬКІ ПОРОДИ – СЕГНЕТОЕЛАСТИКИ

Мета. Виявлення в гірських породах рис і властивостей, притаманних сегнетоеластикам.

Методи дослідження. Лабораторні експерименти з деформування гірських порід в об'ємному полі стискаючих напружень, макро- і мікроскопічні дослідження деформацій і орієнтування оптичної індикатриси, аналіз отриманих даних.

Результати досліджень. В результаті мікроскопічних і оптичних досліджень порід в тонких шліфах на поляризаційному мікроскопі, випробувань порід в умовах неравнокомпонентного тривісного стискання, аналізу отриманих результатів встановлено, що породоутворюючі мінерали осадової товщі при нормальній температурі і відсутності зовнішнього навантаження мають доменну структуру. В умовах тривісного нерівнокомпонентного стискання об'ємні деформації на мікро- і макрорівнях не перевищують сотих часток, при цьому величина відносних мікродеформацій повністю відповідає величині дилатансійного обсягу на макрорівні. Зсувні ротаційні деформації досягають 15-20%, резонансний їх приріст зростає в кілька разів за три періоди до руйнування. В процесі навантаження напрямок ротації змінюється 3-4 і більше разів, змінює напрямок оптична індикатриса. Всі деформації є знакозмінними і до резонансу амплітуда їх приросту не перевищує 0,5%. В процесі навантаження деформаційні, пружні, оптичні, електромагнітні та інші параметри змінюються скачками (структурно-фазові переходи другого, а при руйнуванні -першого і третього роду). Зв'язок між навантаженням і деформаціями нелінійний, виділяється ряд характерних деформацій, при яких ці скачки відбуваються. Все вищевказане свідчить про те, що гірські породи є класичними дисторсіонними сегнетоеластиками. В якості параметрів сегнетоеластичного переходу можуть бути прийняті: величина або приріст величини відносної деформації; пружні модулі, що змінюються в межах $\pm \infty$; знак і величина приросту кута Лодє для деформацій; кут повороту оптичної індикатриси, наявність структурно-фазових переходів в мінералах.

Наукова новизна. Вперше показано, що в осадових гірських породах присутні всі п'ять ознак і рис сегнетоеластиків.

Практична значимість. Можливість виділення сегнетоеластиків без трудомістких мікроскопічних і електромагнітних досліджень.

Ключові слова: гірські породи, доменна структура, сегнетоеластики, деформація, піддатливість, точка біфуркації.

Вступ.

Ряд останніх робіт авторів [1], присвячені дослідженню ауксетичних властивостей гірських порід. Ауксетики – це матеріали з від'ємним коефіцієнтом поперечної деформації, тому ні про який боковий розпір при визначенні бокових компонент поля напружень в незайманому масиві до досягнення порогу дилатансії мова не йде. Цілком зрозуміло, що у більшості спеціалістів – гірників, вихованих на лінійній теорії пружності і гіпотезі Динника А.Н. про розподіл гірського тиску в незайманому масиві [2], при згадуванні про ауксетики виникають «смутні сумніви». В даній роботі наводяться дані про те, що гірські породи виявляють ауксетичні властивості тому, що мінерали, які їх складають, є сегнетоеластиками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сегнетоеластики – це особливий клас кристалічних твердих тіл, в яких в результаті структурно-фазового переходу з більш симетричної (параеластичної) в менш симетричну (сегнетоеластичну) фазу в певному температурному інтервалі спонтанно (мимовільно) виникає деформація кристалічної решітки відносно первинної, яка може бути орієнтована прикладеними до кристалу зовнішніми механічними навантаженнями.

Пружні властивості більшості твердих тіл при достатньо малих механічних навантаженнях визначаються законом Гука, що відбиває лінійну залежність між навантаженням σ і деформацією ϵ : $\sigma = E \epsilon$, де E – модуль пружності, жорсткість або опір деформації. Зворотня величина жорсткості – піддатливість, проводимість деформації.

Для кристалів з низькою симетрією повний опис пружних властивостей потребує знання великої кількості компонент піддатливості або жорсткості по різних напрямках. Наприклад, для цинку їх п'ять, для тригліцинсульфату – тринадцять. Деформація, як реакція на зовнішній вплив, також повинна вміщувати велику кількість компонент [3]. Сегнетоеластики – це речовини з нелінійними механічними і пружними властивостями. Якщо відбувається п рівномірне нагрівання, симетрія кристалу до температури фазового переходу не змінюється, але в сегнетоеластiku обов'язково виникає нова компонента деформації (сегнетоеластичний фазовий перехід) [4]. Розрізняють чисті сегнетоеластики і сегнетоеластики - феромагнетики. Сегнетоеластичні кристали можуть бути одноосовими, в яких спонтанна деформація виникає тільки вздовж однієї з осей кристалу (тільки поздовжня або тільки поперечна), а також багато осовими. І на макроскопічному, і на мікроскопічному рівнях сегнетоеластики виявляють суттєві особливості в поведінці. Тому всі кристали з структурно-фазовими переходами є сегнетоеластиками. Фазові переходи поділяються на дві великі групи: реконструктивні, що супроводжуються переміщенням атомів на великі відстані з радикальною перебудовою структури; дисторсійні, при яких відбуваються невеликі зміщення атомів на долі елементарної комірки, малими викривленнями вихідної структури, для їх опису вводять параметр переходу. Параметр переходу – це деяка величина, що з'являється в низько-симетричній фазі. В якості параметру переходу частіше всього використовується макроскопічна величина, яка легко вимірюється в експерименті: деформація, електрична поляризація, намагніченість та ін. Довкола області структурно-фазового переходу ці величини ведуть себе аномально (змінюються стрибком, проходять через екстремум, точку біфуркації тощо).

Загальними рисами сегнетоеластичних та інших структурно-фазових переходів (електронних, магнітних, поліморфних та ін.) є:

1. Існує параметр переходу.
2. Викривлення кристалічної решітки і зміщення атомів при переході малі в порівнянні з параметрами елементарної

комірки; при збільшенні температури спонтанна деформація зменшується за величиною і зникає при температурі Кюрі. Сегнетоеластик переходить у параеластик стрибком в результаті фазового переходу першого роду.

3. В сегнетоеластiku при охолодженні нижче точки Кюрі (нижче точки переходу) виникають сегнетоеластичні домени (пружні двійники).

При відсутності зовнішнього механічного навантаження сегнетоеластик розбивається на домени таким чином, щоб сумарна деформація зразка, з урахуванням її знаків, в кожному домені дорівнювалась нулю, що відповідає мінімуму енергії. Під дією зовнішнього механічного навантаження, прикладеного певним чином, домени стають енергетично нееквівалентними, більш сприятливо орієнтовані відносно зовнішнього напруження ростуть за рахунок інших, формується нова доменна структура. Взаємодіючі межі призводять до тертя, зменшення напружень і зміни знаку деформацій (спонтанні деформації можуть бути реорієнтовані). При великих навантаженнях кристали стають монодоменими, а їх сумарна деформація досягає насичення.

4. Нижче точки Кюрі під дією зовнішнього механічного навантаження сегнетоеластичні домени можуть перемикатися з одного орієнтаційного стану в інший, що призводить до нелінійної залежності деформації від навантаження, оптична індикатриса змінює напрям. Роль деполаризуючого поля грають ротаційні зсувні деформації. При зміні напрямку поляризації на 180° поворот оптичної індикатрисы відбувається на 90° .

5. Навколо області сегнетоеластичного фазового переходу спостерігаються аномалії різних фізичних властивостей.

В [6] досліджені незворотні процеси в полікристалічних сегнетоелектричних кераміках. Показано, що ці процеси зв'язані з внутрішньою перебудовою структури кераміки, що призводить до зміни механічних і електричних властивостей матеріалу. Змінюються не тільки п'єзоелектричні модулі, але й пружні піддатливості (модулі пружності) і діелектрична проникливість. Доведено, що

фізичні характеристики частково поляризованого або деполаризованого тіла, як і у випадку неоднорідної поляризації, залежать лінійним чином від остаточної деформації і остаточної поляризації. Зокрема, виявилось, що пружні піддатливості і діелектричні проникливості залежать від деформацій, в той час як п'єзо модулі залежать від поляризації. У визначаючих співвідношеннях лінійна залежність зберігається при будь-яких співвідношеннях лінійна залежність зберігається. при будь-яких значеннях і орієнтації остаточних параметрів тензору деформації і поляризації. Побудовані визначальні лінійні тензорні співвідношення, що пов'язують вектор електричної індукції і тензор деформацій з визначальними параметрами (вектор електричного поля і тензор напружень).

Розробці теорії сегнетоеластичних структурно-фазових переходів і практичному використанню сегнетоеластиків присвячені роботи [5,7-9]. Велика кількість публікацій присвячена вивченню властивостей, еволюції доменної структури і аномальним явищам в сегнетоеластиках [10-14].

На думку авторів цієї роботи доцільно розглянути можливість використання вказаних властивостей і закономірностей сегнетоеластиків до проблем гірничого виробництва.

Мета статті.

Метою роботи є аналіз поведінки гірських порід при дії зовнішнього механічного навантаження і виявлення сегнетоеластичних рис і властивостей.

Методи дослідження.

Лабораторні експерименти з деформування гірських порід в об'ємному полі стискаючих напружень, макро- і мікроскопічні дослідження деформацій, аналіз отриманих даних.

Викладення основного матеріалу.

Основними породоутворюючими мінералами в осадових гірських породах Донбасу є кварц, польові шпати, глинисто-слюдисті мінерали і карбонати. Із зразків пісковика, шахт ім. О.О. Скочинського і «Капітальна» ДП «Мирноградвугілля» з різними видами і типами цементу були виготовлені прозорі шліфи і проведені

мікроскопічні дослідження деформаційних структур у породоутворюючих мінералах на поляризаційному мікроскопі НП-3. В якості еталону було прийнято доменну структуру класичного сегнетоеластика – сегнетової солі (рис.1).

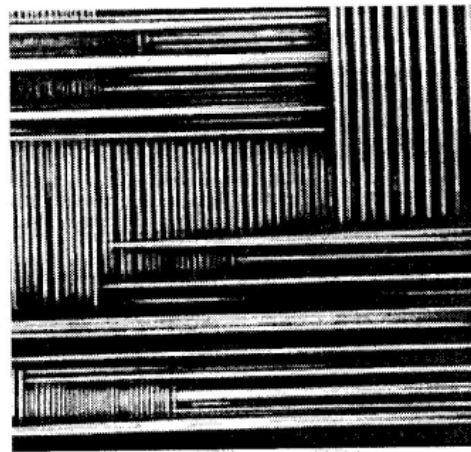


Рис. 1. Зображення доменної структури монокристалу сегнетової солі у поляризованому світлі

Слід відзначити, що при нормальній температурі і при відсутності зовнішнього тиску (історія попереднього навантаження в надрах невідома) всі породоутворюючі мінерали придбали певну доменну структуру. Форма доменів різноманітна. Частіше за все зустрічаються двійники, однак зустрічаються (особливо у кварці) і інші деформаційні структури. Найбільш близькою до класичної є структура мікрокліну і кальциту (рис. 2д и 2е). В глинистих мінералах структуру зерна (монокристалу) видно тільки під електронним мікроскопом (рис. 2к). Розбивка породоутворюючих мінералів на домени-фрагменти є однією з основних ознак сегнетоеластика.

Для виявлення параметрів переходу і поведінки гірських порід при зовнішньому механічному навантаженні розглянемо трьохосьове нерівнокомпонентне стискання кубічних зразків вугілля, аргіліту та пісковиків. В нерівнокомпонентному полі зовнішніх навантажень поведінка гірських порід представляється звичайно у вигляді двох діаграм «середнє напруження- об'ємна деформація» і «октаедричне дотичне напруження— зсувна деформація».

Однак, для тих, хто звик до експериментів на одноосьове стискання на

рис. 3 данні представлені у вигляді діаграм «максимальне напруження-максимальна деформація». Для більш чіткого

встановлення характерних деформацій, при яких відбуваються стрибкоподібні зміни піддатливості матеріалу наведена

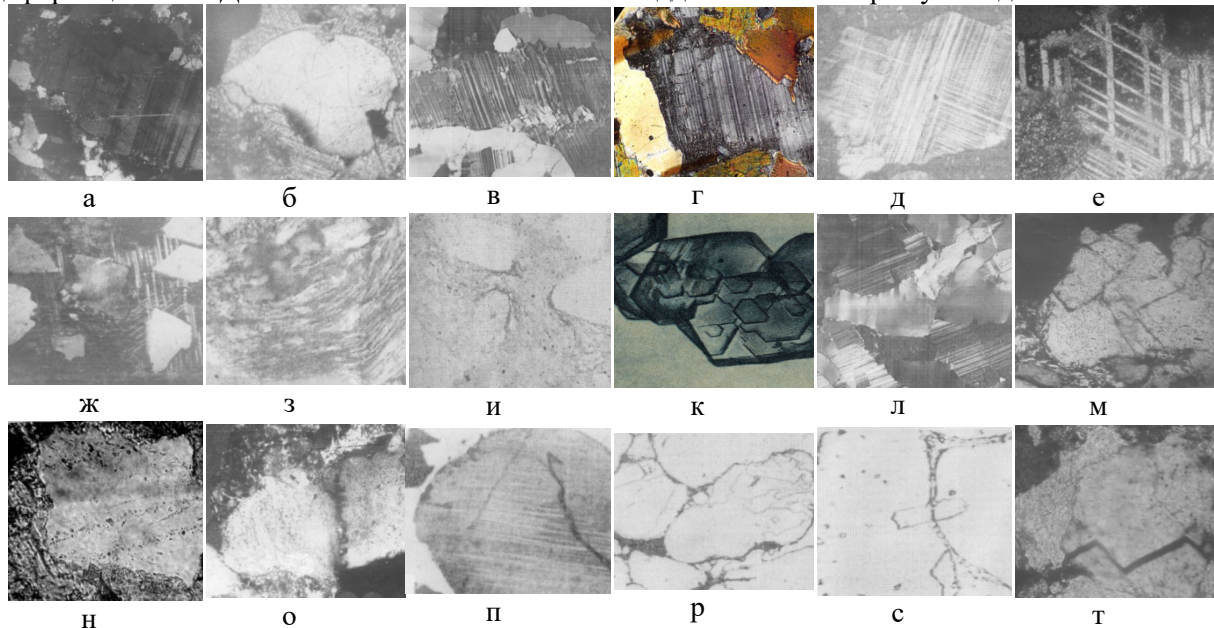
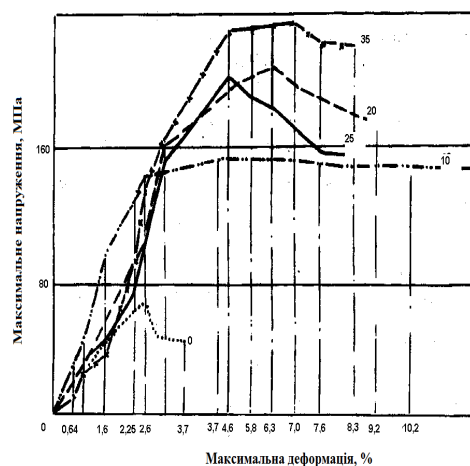
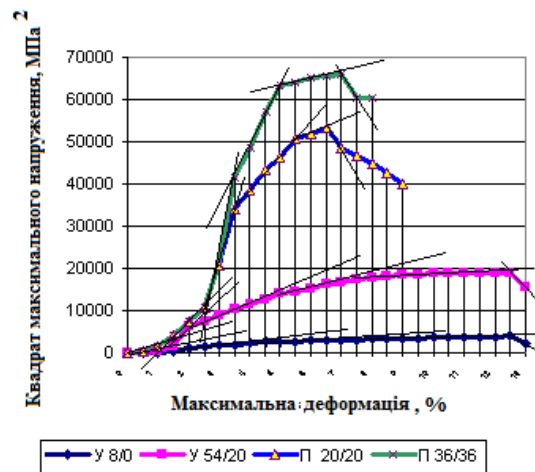


Рис. 2. Деформаційні структури в породоутворюючих мінералах:

а- полісинтетичні двійники в ортоклазі; б-г – полісинтетичні двійники з симетричним погасанням в плагіоклазах; д – полісинтетичні двійники з досконалою спайністю в двох напрямках під кутом приблизно 90° в мікрокліні; е – площини спайності у кальциті при карбонатному цементі; ж – площини двійникування у біотиті слюдиного цементу; з – пластинчасті кристали мусковіту в слюдиному цементі; и – листочки хлориту в цементі; к – зерна каолініту під електронним мікроскопом; л – мозаїчне (хвилясте) вгасання кварцу і деформований плагіоклаз; м – фрагментоване зерно кварцу; н – ряди надмілких двійників, пов'язаних з деформаційним пластинкуванням і поясами деформації у кварці; о – диференційне скочвання з утворенням нової фази з більш низькою симетрією у кварці; п – ірраціональні двійники у кварці; р-дофінейські двійники у кварці; с – парні двійники тиску на контактах зерен кварцу; т – зигзагоподібна тріщина в момент α - β -переходу в кварці.



а)



б)

Рис. 3. Характерні лінійні деформації, при яких відбуваються структурно-фазові переходи другого роду із стрибкоподібною зміною піддатливості в пісковнику при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ (а) та у вугіллі і пісковнику (б) при $\sigma_1 > \sigma_2 \geq \sigma_3$

діаграма «квадрат максимального напруження – максимальна деформація» (рис. 3б).

Неважко помітити, що і у вугіллі, і у пісковику спостерігається шість-сім характерних точок перелому діаграми. Для

вугілля це деформації 1,5; 2,25; 4,6; 8,3 і 12,7%, для пісковиків 1,5; 2,6; 3,7; 4,6; 6,3; 7,0; 7,6%. Характерно, що такий же ряд деформацій спостерігається в металах і сплавах, тільки в породах, в силу невідповідності напруженого в деформційному стані, ряд деформацій змішаний (при одному і тому ж напруженому стані може реалізуватись і зсув, і ротація (вихор) і, навіть, відрив.

Аналогічні стрибкоподібні зміни пружних модулів або піддатливості спостерігаються і на діаграмах «середнє напруження – середня або об'ємна деформація», «зсувне напруження – зсувна деформація» (рис.4). Характерні деформації, при яких це відбувається, доповнюють єдиний ряд, що підкоряється універсальному прояву структурної гармонії - закону золотого перетину:

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

$$\varepsilon_N = \Phi^2 \left(\frac{1}{\Phi}\right)^{\ell/2+1/4};$$

де γ_N , s_N , ε_N – зсувна, вихрова і нормальна (лінійна) деформації відповідно;

$\Phi = 1,618$ – число Фібія (золоте число);

$\ell = 1, 2, 3, \dots$ – будь-яке ціле квантове число.

При взаємодії з об'єктом, в залежності від його характерних розмірів, можливий резонанс або антирезонанс. На об'ємній складовій (коли характерний розмір об'єкту кратний половині довжини хвилі), спостерігається резонанс. На вихровій (коли характерний розмір об'єкту кратний довжині хвилі) – антирезонанс. Різниця в тому, що об'ємна хвиля резонує на всіх гармоніках, а вихрова – тільки на непарних. При цьому для об'ємної хвилі на резонансі об'єкт характеризується повним пропусканням без віддзеркалення і поглинання (переломлення). Для вихрової (поперечної) хвилі характерно часткове віддзеркалення і часткове поглинання з перетворенням енергії, що поглинається, у власні коливання об'єкту (рис.5). На рисунку 5 добре видно, що різниця між резонансною (ефект монохроматору $f_{mx} = V_p/2h$) і антирезонансною (ефект акустичного резонансного поглинання $f_0 = V_s/h$) частотами невелика (біля 15%). На резонансі збуджуюча хвиля посилюється за

рахунок інтерференції, а на антирезонансі – з послаблюється за рахунок часткового віддзеркалення, але частка, що поглинається, перетворюється на власні коливання об'єкту на частоті, що визначається характерним розміром h .

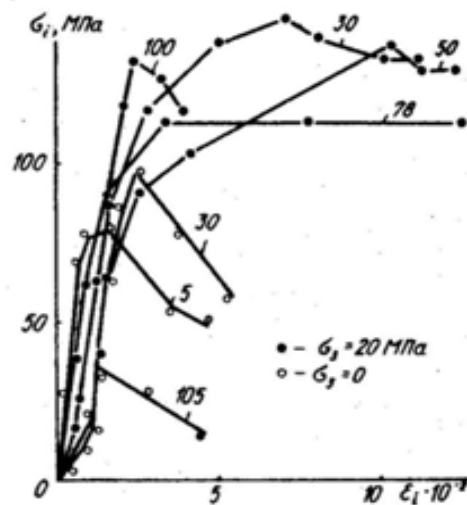
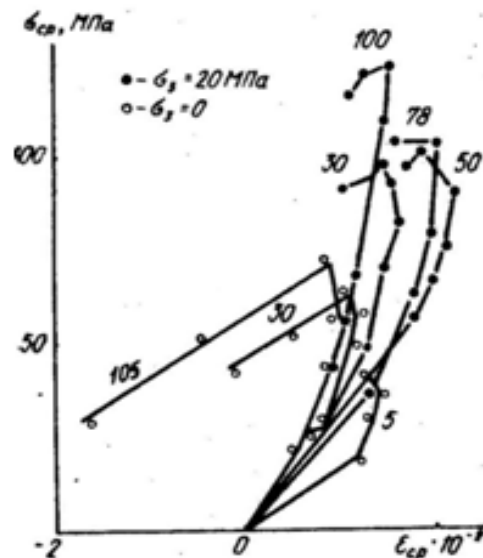


Рис. 4. Діаграми «середнє напруження – середня деформація» (а) і «зсувне напруження – зсувна деформація» (б) в пісковиках при нерівнокомпонентному стисканні

Амплітуда власних коливань залежить від величини добротності породного шару або блоку-резонатора, яка, як правило, не перевищує 10. На рисунках 6-8 показано резонансне збільшення величини приросту деформацій у вугіллі, аргіліті і пісковикі перед руйнуванням при узагальненому стисканні.

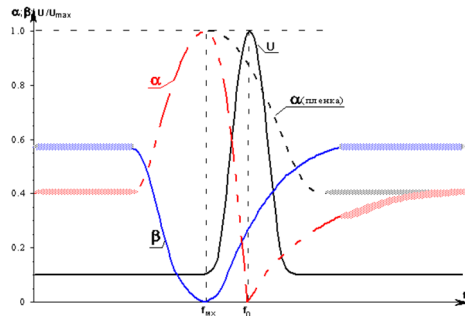


Рис. 5. Частотна залежність коефіцієнтів віддзеркалення β і пропускання α , а також величини ЕДС(U) акустичної хвилі при проходженні через об'єкт з плоскопаралельними межами

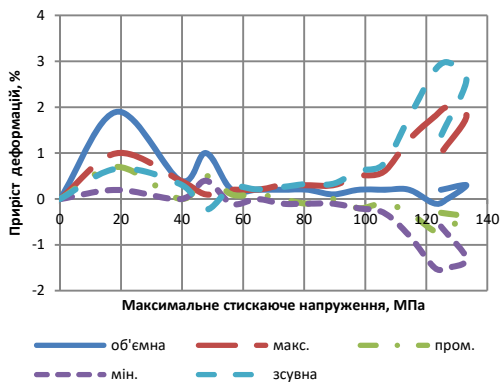


Рис. 6. Зміни приросту деформацій у вугільному зразку при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20$ МПа

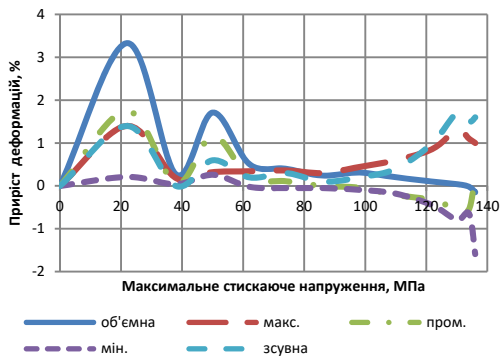


Рис. 7. Зміни приросту деформацій у зразку аргіліту при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20$ МПа

Неважно помітити, що резонанс відбувається приблизно протягом трьох періодів і закінчується руйнуванням. Характерно, що аномально змінюється не тільки приріст деформацій, але й пружні характеристики або зворотна їх величина - піддатливість (рис. 9).

Таким чином, в якості к параметра переходу в гірській породі-сегнетоеластикі можуть бути прийняті: характерна

деформація, приріст деформації, модулі пружності або піддатливість.

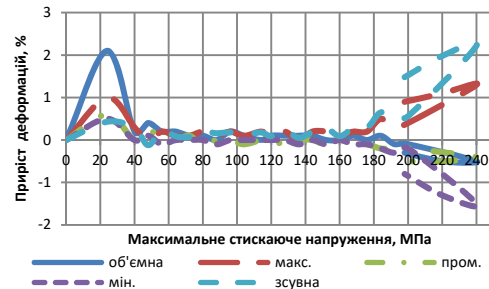


Рис. 8. Зміни приросту деформацій у зразку пісковика при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20$ МПа

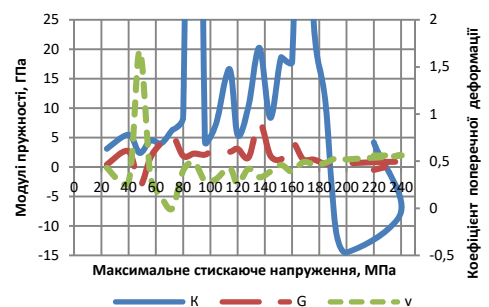
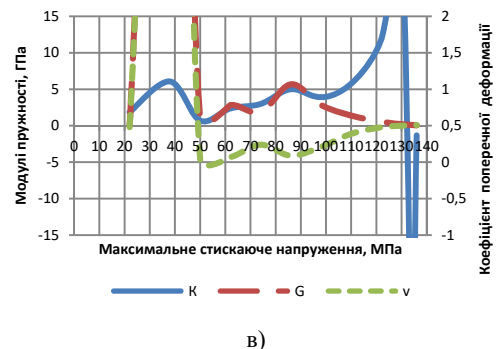
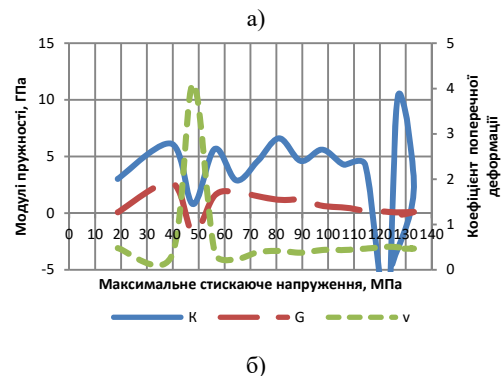


Рис. 9. Зміни пружних параметрів в процесі механічного навантаження вугілля (а), аргіліту (б) і пісковика (в) при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20$ МПа

Слід відзначити, що при землетрусі резонанс триває також три періоду [15,16], причому спостереження ведуть за зміною

прискорення силою тяжіння в часі (рис. 10). Земні приливні коливання мають період 12 годин. За три періоди до землетрусу спостерігається підвищення фону гравітаційного поля і, через період, приріст прискорення силою тяжіння досягає максимального (двократного) значення. Протягом наступних $5/4$ періоду спостерігається поступове зменшення приросту прискорення силою тяжіння до дорезонансного значення і знакозмінний (хвилюподібний) характер змін прискорення зникає. Протягом $3/4$ періоду прискорення силою тяжіння залишається постійним і закінчується поштовхом землетрусу. Після цього періодичний характер зміни сили тяжіння поновлюється. Враховуючи, що прискорення змінюється синфазно з деформацією, резонно припустити, що всі резонансні явища в земній корі, і в гірському масиві зокрема, відбуваються по одному сценарію. Тому в якості параметра переходу можливо використати також прискорення приросту деформації. Типову сейсмограму землетрусу 7 серпня 2016 року наведено на рис. 11.

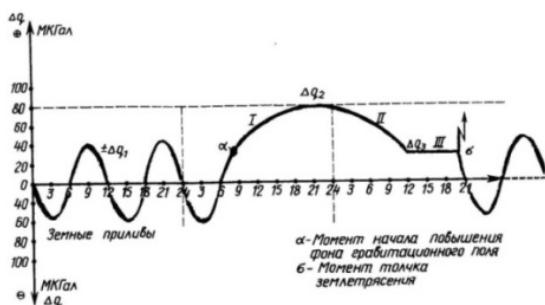


Рис. 10. Зміни прискорення силою тяжіння перед землетрусом

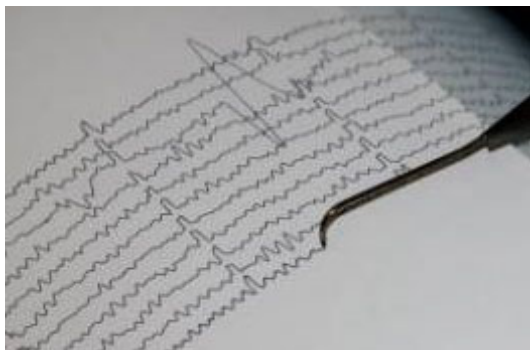


Рис. 11. Сейсмограма землетрусу 7 серпня 2016 року (Мелітопольська сеймостанція)

Аномальна поведінка деформаційних і пружних властивостей гірських порід при

механічному впливі також є ознакою сегнетоеластика.

Оскільки власні коливання породних шарів (блоків) є вихровихвильовими (ротаційними), в процесі механічної дії повинна спостерігатися зміна напрямку обертання вектору деформації [17]. На рисунку 12 показано зміни напрямку обертання вектору деформації відносно вектору напруженого стану. При узагальненому стисканні кут Лоде, що характеризує напрям вектору напруженого стану, постійний і дорівнює 30^0 (по аналогії з електромагнітними хвилями 90^0). Вектор деформаційного стану постійно обертається навколо вектору напруженого стану і змінює напрям обертання 3-4, а то і більше разів (останній раз перед руйнуванням).

Перевимкнення доменів з одного орієнтаційного стану в інший і поворот оптичної індикатрисы [18] є властивістю сегнетоеластика.

Не дивлячись на те, що на мікрорівні деформації в мінералах складають соті і тисячні долі ангстрем і є локальними, спостерігається повна відповідність відносних деформацій на мікро- і макрорівнях [19]. На мікрорівні у кварці вони складають в залежності від напрямку (Hkl) від 0,05% (201) до 1,1% (100,101) (рис. 13) і повністю співпадають з дилатансійною зміною об'єму пісковику (рис.12).

Невеликі величини викривлення кристалічної решітки і зміщення атомів при структурно-фазовому переході в порівнянні з параметрами кристалічної решітки є останньою з п'яти ознак сегнетоеластиків.

Обговорення результатів.

При деформуванні гірських порід в умовах нерівнокомпонентного об'ємного стискання спостерігаються всі п'ять ознак і рис сегнетоеластиків:

1. На мікрорівні в породотворюючих мінералах відносні деформації не перевищують 1,1% від параметрів решітки і повністю погоджуються з відносною величиною дилатансійного збільшення об'єму зразка на макрорівні при об'ємному стисканні.

2. При температурі нижче точки Кюрі при відсутності зовнішніх механічних навантажень всі породотворюючі мінерали

мають сегнетоеластичні домени (пружні двійники та інші деформаційні структури).

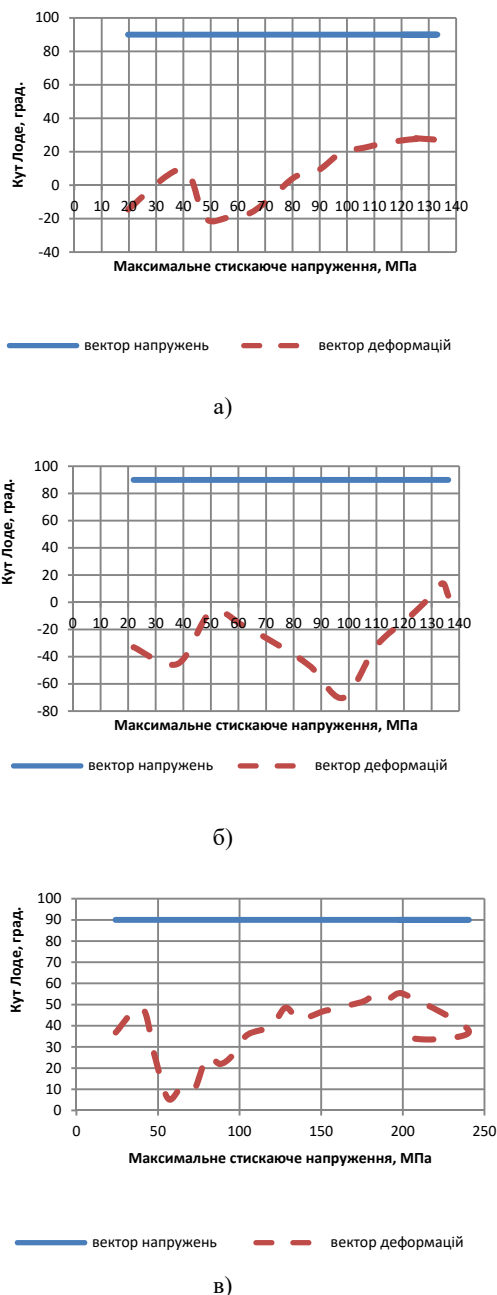


Рис. 12. Зміни кута Лодє для деформацій в процесі навантаження вугілля (а), аргіліту (б) і пісковику (в) при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20$ МПа

3. Під дією зовнішнього механічного навантаження межі доменів взаємодіють, сприятливо орієнтовані домени ростуть за рахунок інших, встановлюється нова доменна структура, виникають знакозмінні деформації, в тому числі ротаційні не більше 0,5%. Деформації в процесі навантаження реорієнтуються, змінюючи 3-4 і більше разів напрямки ротації. Зв'язок між зовнішнім навантаженням і деформаціями нелінійний.

При характерних деформаціях, що підкоряються закону золотого перетину, відбуваються стрибкоподібні зміни пружних параметрів. При великих навантаженнях досягається межа стискання, жорсткість системи проходить через точку біфуркації ($\pm\infty$), знакозмінність деформації зникає, виникає резонансне збільшення приросту деформацій в декілька разів (на величину добротності), кристали в площині локалізації деформації стають монодоменими, їх сумарна деформація досягає насичення, виникають локальні структурно-фазові переходи другого, третього і першого роду з наступним руйнуванням.



Рис.13. Залежність макродеформації збільшення об'єму при об'ємному стисканні в залежності від виду деформаційного стану

4. Параметрами сегнетоеластичного переходу можуть бути: величина відносної деформації, приріст відносної деформації, модуль об'ємного стискання і модуль зсуву, величина зворотня модулям пружності - піддатливості деформації, зміна напрямку ротації, поворот оптичної індикатриси, зміна прискорення силою тяжіння або прискорення деформації тощо.

5. Навколо області сегнетоеластичного фазового переходу спостерігаються аномалії різних фізичних властивостей: стрибкоподібні зміни

пружних, міцностних, оптичних, електромагнітних параметрів тощо.

Висновки.

Осадкові гірські породи Донбасу складаються з мінералів, що володіють поліморфізмом, при зовнішньому механічному навантаженні ведуть себе як класичні сегнетоеластики з численними структурно-фазовими переходами другого роду. При переходах першого і третього роду породи руйнуються.

Список літератури

1. Рязанцев Н.А., Рязанцев А.Н. Ауксетические свойства горных пород как следствие квантования деформаций и кусочно-линейной упругости. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2018. №2(43). С.46-56.
2. Динник А.Н. О давлении горных пород и расчете крепи вертикальной шахты. *Инженерный работник*. 1925. №7. С.15-18.
3. Гринев С.А. Сегнетоэластики – новый класс кристаллических твердых тел. *Соросовский образовательный журнал*. 2000. №8. С. 100-107.
4. Шувалов Д.А. Сегнетоэластики. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1979. Т.43. №8. С.1554-1560.
5. Алексеев А.Н., Злоказов М.В., Осипов И.В. Применение сегнетоэластиков. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1983. Т.47. №3. С.465-475.
6. Скалиух А.С. Функциональная зависимость физических характеристик от необратимых параметров при электромеханическом воздействии на сегнетоэлектрические керамики. *Вестник Томского государственного университета*. 2019. №58. С. 128-139.
7. Баранов В.А. Микродеформации кварца карбоновых песчаников Донбасса. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2014. № 12. С. 75-86.
8. Захаров М.А., Кукушкин С.А., Осипов А.В. Теория фазовых переходов первого рода и зарождение доменной структуры в одноосных сегнетоэластиках-сегнетоэлектриках и многоосных сегнетоэлектриках. *Проблемы механики деформируемых твердых тел и горных пород*. Сб. статей к 75-летию Е.И. Шемякина. Москва: Физматлит, 2006. С.265-283.
9. Гуфан А.Ю. Полносимметричный параметр порядка с феноменологической теории фазовых переходов. *Сегнетоэластики. ЖЭТФ*, 2007. Т.132. Вып.1. С.138-149.
10. Tishin A.M., Spichkin Y.I. The magnetocaloric effect and its applications. Series in condensed matter physics. Bristol, Institute of Physics Publ., 2003. 475 p.
11. Nakatani N. Observation of ferroelectric domain structure in TGS. *Ferroelectrics*. 2011. Vol. 413. P. 238–265.
12. Lee J.K. Direct observation of asymmetric domain wall motion in a ferroelectric capacitor. *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. P. 6765-6777.
13. Menzel A., Arockiarajan A., Sivakumar S.M. Two models to simulate rate-dependent domain switching

effects – application to ferroelectric polycrystalline ceramics. *Smart Matter Struct.* 2008. Vol. 17. P. 015026-015039.

14. Krylov A.S., Vtyurin A.N., Voronov V.N., Krylova S.N. Phase transitions in Rb2KLuF6 crystal. *Ferroelectrics*. 2019. Vol. 538. P. 28-34.

15. Амирханов Х.И., Сардаров С.С. Способ прогнозирования землетрясений. Описание изобретения к авторскому свидетельству. 1976. бюл. №2.

16. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Гравитационные эффекты перед сильными, удаленными землетрясениями. *Вестник Международной академии наук (русская секция)*. 2007. Вып. 2. С.45-52.

17. Рязанцев А.Н., Стариков Г.П. Ротационные деформации в горных породах. *Физико-технические проблемы горного производства*/ 2013. Вып.16. С.119-125.

18. Ягнышева Т.В., Рязанцев Н.А., Стариков Г.П. Моделирование процессов переориентировки оптической индикатрисы витринита углей при изменении локальных полей напряжений. Деп. ВИНТИ, 1985. №7702-13. 12 с.

19. Рязанцев А.Н. Структурно-фазовые переходы в горных породах и соответствие относительных деформаций на микро- и макро-уровнях. *Физико-технические проблемы горного производства*. 2012. Вып.15. С.42-54.

References

1. Ryazantsev, N.A., Ryazantsev, A.A. (2018). Aukseticheskiye svoystva gornyykh porod kak sledstviye kvantovaniya deformatsiy i kusochno-lineynoy uprugosti. *Visti Donec'kogo gornichogo institutu*, 2(43), 46-56. (in Russian)
2. Dinnik, A.N. (1925). O davlenii gornyykh porod i raschete krepri vertikal'noy Shakhthy. *Inzhenernyy rabotnik*, 7, 15-18. (in Russian)
3. Gridnev, S.A. (2000). Segnetoelastiki – novyy klass kristallicheskiykh tverdykh tel. *Soros Educational Journal*, 8, 100-107. (in Russian)
4. Shuvalov, D.A. (1979). Segnetoelastiki. *Izv. USSR Academy of Sciences. Ser.phys.*, 43, (8), 1554-1560. (in Russian)
5. Alekseev, A.N., Zlokazov, M.V., Osipov, I.V. (1983). Primeneniye segnetoelastikov. *Izv. USSR Academy of Sciences. Ser.phys.*, 47(3), 465-475. (in Russian)
6. Skaliuh, A.S. (2019). Funktsional'naya zavisimost' fizicheskikh kharakteristik ot neobratimyykh parametrov pri elektromekhanicheskom vozdeystvii na segnetoelektricheskiye keramiki. *Bulletin of Tomsk State University*, 58, 128-139. (in Russian)
7. Baranov, V.A. (2014). Mikrodeformatsii kvartsa karbonovykh peschanikov Donbassa. *Bulletin of PNIPU. Geology. Oil and gas and mining*, 12, 75-86. (in Russian)
8. Zakharov, M.A., Kukushkin, S.A., Osipov, A.V. (2006). Teoriya fazovykh perekhodov pervogo roda i zarozhdeniye domennoy struktury v odnoosnykh segnetoelastikakh-segnetoelektrikakh i mnogoosnykh segnetoelektrikakh. *Problemy mekhaniki deformiruyemykh tverdykh tel i gornyykh porod. Sat articles for the 75th anniversary of E.I. Shemyakina*. Moskva: Fizmatlit. (in Russian)

9. Gufan, A.Yu. (2007). Polnosimmetrichnyy parametr poryadka s fenomenologicheskoy teorii fazovykh perekhodov. *Segnetoelastiki. JETP*, 132, 1, 138-149. (in Russian)
10. Tishin, A.M., Spichkin, Y.I. (2003). *The magnetocaloric effect and its applications. Series in condensed matter physics. Institute of Physics Publ. Bristol, Philadelphia.*
11. Nakatani, N. (2011). Observation of ferroelectric domain structure in TGS. *Ferroelectrics*, 413, 238-265.
12. Lee, J.K. (2013). Direct observation of asymmetric domain wall motion in a ferroelectric capacitor. *Acta Materialia*, 61, 6765-6777.
13. Menzel, A. (2008). Two models to simulate rate-dependent domain switching effects – application to ferroelectric polycrystalline ceramics. *Smart Matter Struct.*, 17, 015026-015039.
14. Krylov, A.S., Vtyurin, A.N., Voronov, V.N., Krylova S.N. (2019). Phase transitions in Rb2KLuF6 crystal. *Ferroelectrics*, 538, 28-34.
15. Amirkhanov, Kh.I., Sardarov, S.S. (1976). Sposob prognozirovaniya zemletryaseniy. Opisaniye izobreteniya k avtorskomu svidetel'stvu, Bul. 2. (in Russian)
16. Khain, V.E., Khalilov, E.N. (2007). Gravitatsionnyye efekty pered sil'nymi, udalennymi zemletryaseniyami. *Bulletin of the International Academy of Sciences (Russian section)*, 2, 45-52. (in Russian)
17. Ryazantsev, A.N., Starikov, G.P. (2013). Rotatsionnyye deformatsii v gornykh porodakh. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva*, 16, 119-125. (in Ukrainian)
18. Yagnysheva, T.V., Ryazantsev, N.A., Starikov, G.P. (1985). Modelirovaniye protsessov pereoriyentirovki opticheskoy indikatsiyi vitrinita ugley pri izmenenii lokal'nykh poley napryazheniy. Dep. VINITI. (in Russian)
19. Ryazantsev, A.N. (2012). Strukturno-fazovyye perekhody v gornykh porodakh i sootvetstviye odnositel'nykh deformatsiy na mikro- i makro-urovnyakh. *Physicotechnical problems of mining*, 15, 42-54. (in Ukrainian)

Надійшла до редакції 25.11.2020

Рецензент канд. техн. наук, доц. В.І. Каменець.

Рязанцев Микола Олександрович - доцент, канд. техн. наук, доцент каф. Геодезії та будівництва підземних споруд Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: mykola.riazantsev@ii.donntu.edu.ua

Носач Олександр Костянтинович - доцент, канд. техн. наук, професор каф. Розробки родовищ корисних копалин Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: oleksandr.nosach@ii.donntu.edu.ua

Рязанцев Антон Миколайович – викладач відділу навчання і розвитку персоналу ПрАТ «ШУ «Покровське», (пл. Шибанкова, 1, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: anton.riazantsev@ii.donntu.edu.ua

ROCKS – SEGNETOELASTICS

Purpose. Identification of the features and the properties of segnetoelastics in rocks.

Research Methods. Laboratory experiments on the deformation of rocks in a volume field of compressive stresses, macro- and microscopic studies of the deformations and the orientations of an optical indicatrix, analysis of the data obtained.

Research results. As a result of microscopic and optical studies of rocks in thin sections on a polarizing microscope, tests of rocks under the conditions of unequal triaxial compression, analysis of the results obtained, it was found that the rock-forming minerals of the sedimentary sequence at a normal temperature and in the absence of an external load have a domain structure. Under the conditions of a triaxial unequal component compression, the volumetric deformations at the micro and macro levels do not exceed hundredths, while the relative micro deformations fully correspond to the dilatancy volume at the macro level. Shear rotational deformations reach 15–20%, their resonant increment increases several times over three periods before the destruction. During the loading, the direction of the rotation is changed 3-4 or more times, an optical indicatrix changes the direction. All deformations are alternating in sign and, until resonance, the amplitude of their increment does not exceed 0.5%. During the loading, the deformation, elastic, optical, electromagnetic, and other parameters are changed abruptly (structural-phase transitions of the second, and upon the destruction, of the first and third kind). The interconnection between the load and the deformations is nonlinear, a number of characteristic deformations are distinguished at which these jumps occur. All said indicate that rocks are classical distortion segnetoelastics. The following parameters can be taken as parameters of a segnoelastic transition: the value or increase in the value of relative deformation; an elastic modulus varying within $\pm \infty$; the sign and the magnitude of the increment of the Lode angle for the deformations; the angle of rotation of the optical indicatrix, the presence of structural-phase transitions in the minerals.

Scientific novelty. It has been shown for the first time that all five signs and traits of segnetoelastics are present in sedimentary rocks.

Practical significance. *The possibility for isolating of segnetoelastics without laborious microscopic and electromagnetic studies.*

Key words: *rocks, domain structure, segnetoelastic, deformation, bifurcation point.*

Ryazantsev Nikolay – Associate Professor, Ph.D., Associate Professor of the department mining management State Higher Educational Institution "Donetsk National Technical University" (2, Shibankova Sq, Pokrovsk, 85300, Ukraine).

E-mail: mykola.riazantsev@ii.donntu.edu.ua

Nosach Alexander – Associate Professor, Ph.D., Professor of the department mining management State Higher Educational Institution "Donetsk National Technical University" (2, Shibankova Sq, Pokrovsk, 85300, Ukraine).

E-mail: oleksandr.nosach@ii.donntu.edu.ua

Ryazantsev Anton – design engineer, Krasnoarmeysk factory of industrial equipment (82, Nakhimova St., Pokrovsk, 85300, Ukraine).

E-mail: anton.riazantsev@ii.donntu.edu.ua