

М.О.РЯЗАНЦЕВ, О.К. НОСАЧ, кандидати техн. наук, доценти, А.М. РЯЗАНЦЕВ, асистент
Індустріальний інститут ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
В.В. КУЛІВАР, аспірант
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

РЕЗОНАНС В ГІРСЬКОМУ МАСИВІ ПРИ ГЕОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩАХ

Мета. Основною метою роботи є розробка деформаційного передвісника геодинамічних явищ в гірському масиві.

Методи досліджень. В роботі наведені експериментальні дані з деформування і руйнування гірських порід в об'ємному напруженому стані на установці нерівнокомпонентного об'ємного стискання конструкції ДонФТІ НАН України з дослідження змін амплітуди приросту лінійних, об'ємних і зсувних деформацій та пружних параметрів гірських порід в процесі навантаження. Проаналізовано умови виникнення резонансних явищ при деформуванні і руйнуванні гірських порід.

Наукова новизна. Вперше показано, що пружні характеристики гірських порід не є константами матеріалу, а змінюються за величиною і за знаком в процесі механічного навантаження. В процесі деформування гірських порід спостерігається чотири характерних етапи. З точки зору руйнування найбільш цікавим є третій етап – резонансне зростання приросту максимальної, мінімальної і зсувної деформації. Коли модуль об'ємного стискання проходить через безкінечність виникає течія, а коли він дорівнює модулю зсуву, виникає ударна хвиля і динамічне руйнування гірських порід.

Практичне значення. Резонансне зростання амплітуди приросту максимальної, мінімальної і зсувної деформації є критерієм руйнування взагалі, і динамічного руйнування зокрема, що на практиці може використовуватись як передвісник або прогностичний критерій руйнування.

Результати. Показано, що гірські породи є класичними ауксетиками, в яких пружні показники в процесі механічного навантаження змінюють величину і знак. Характерні деформації, при яких пружні характеристики змінюють свою величину, є квантованими і постійними для всіх матеріалів. Найбільш інформативним показником з точки зору руйнування є амплітуда приросту деформацій в процесі навантаження. Показано, що перед руйнуванням відбувається резонансне зростання амплітуди приросту лінійних і зсувних деформацій внаслідок подвійного вихрового резонансу по швидкості, розмірах структур і частоті. Умовою резонансу є проходження модулю об'ємного стискання через безкінечність і зрівняння з модулем зсуву.

Ключові слова: геодинамічні явища, пружні характеристики, ауксетики, приріст деформації, резонанс, руйнування

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-104-36-42

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Історично так склалося, що проблема руйнування матеріалів під дією механічного впливу взагалі і виникнення геодинамічних явищ в гірському масиві зокрема, вирішувалась шляхом створення різноманітних теорій міцності та емпіричних, статистичних і геофізичних способів прогнозу геодинамічних явищ. Результатом такого підходу є відсутність загальноприйнятого, науково обґрунтованого і надійного способу прогнозу руйнування порід і виникнення гео- і газодинамічних явищ. Проблема їх створення залишається актуальною.

Аналіз досліджень і публікацій. Деформації в гірському масиві поширюються у вигляді об'ємної деформаційної хвилі про що свідчить їх знакоперемінний характер [1-3].

При випробуванні гірських порід на одноосне стискання і фіксації деформацій за допомогою тензодатчиків в [1] встановлено характерні етапи об'ємного деформування зразків порід. На початковому етапі одноосного стискання приріст зменшення об'єму досягає максимуму по всіх лініях фіксації деформацій, після чого він зменшується і досягає нуля (порогу дилатансії). Після цього відбувається розподіл ділянок деформування: в одному напрямку об'єм і далі зменшується, а в другому – об'єм починає збільшуватись. Циліндричний зразок в поперечному розрізі при цьому набуває форми вісімки. Слід відзначити, що кожен з етапів має однозначну інтерпретацію і фіксується досить точно, тому автори пропонують цей показник в якості передвісника руйнування.

Головним недоліком передвісників на базі об'ємної деформації є те, що приріст об'ємних деформацій неможливо поміряти, а можна тільки розрахувати. До того ж експерименти проведені тільки при одноосному стисканні у міцних породах, деформації, що фіксуються тензодатчиками, є пружними, дуже малими (0,001...0,01)%, суттєво відрізняються від фактичних дефо-

рмацій в гірських породах, які досягають 10% і більше, тому для практичного використання запропоновані передвісники руйнування не придатні.

Вказане вище свідчить про те, що проблема пошуку причин і передвісників руйнування гірських порід взагалі і у вигляді геодинамічних явищ зокрема залишається актуальною. Вирішення цієї проблеми можливе шляхом дослідження приросту не тільки об'ємної, а і всіх трьох лінійних і зсувної деформації на октаедричній площинці при нерівнокомпонентному трьохосному стисканні осадових порід карбону Донбасу. Численні експериментальні лабораторні дослідження, проведені авторами цієї роботи на установці нерівнокомпонентного об'ємного стискання конструкції ДонФТІ АН України [4] на кубічних зразках вугілля, аргіліту, алевроліту, пісковиків дозволяють ліквідувати недостачу інформації з цього приводу.

Постановка задачі. Дослідження змін приросту деформацій та пружних параметрів гірських порід з ціллю встановлення резонансних явищ при їх деформуванні і руйнуванні.

Викладення матеріалу та результати. Традиційно результати досліджень поведінки порід при нерівнокомпонентному стисканні наводять у вигляді двох діаграм: «кульовий тензор напружень – відносна об'ємна деформація», «октаедричне дотичне напруження – відносна октаедрична дотична (зсувна) деформація» (рис. 1 а і 1б).

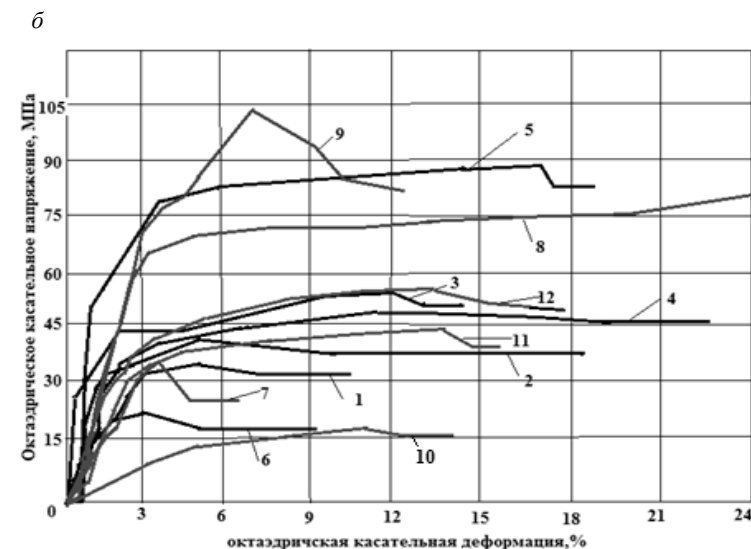


Рис. 1. Залежність «октаедричне нормальне напруження (кульовий тензор) – об'ємна деформація» (а) та «октаедричне дотичне напруження-октаедрична дотична деформація» (б) для аргіліту (1-6), пісковиків (7-9) і вугілля (10-12) при різних видах напруженого стану

Ці діаграми дозволяють визначити пружні параметри (модуль об'ємного стискання, модуль зсуву, коефіцієнт поперечної деформації), характерні деформації, при яких пружні параметри змінюються стрибком, закономірності зміни міцності і енергоємності-руйнування порід від виду напруженого і деформаційного стану тощо. Але а ні абсолютна величина навантаження, а ні величина відносних деформацій в загальному випадку критерієм руйнування бути не можуть навіть для одного і того ж виду напруженого стану, або одного і того ж кульового тензору напружень. Межа міцності і гранична відносна деформація залежать від багатьох факторів, вплив яких навіть не завжди усвідомлю-

ється. Для прикладу на рис.2 наведено залежність міцності, модуля спаду, граничної і повної зсувної деформації від виду деформаційного стану.

Як показано в [5,6], характерні деформації, при яких модулі пружності змінюються стрибком для вугілля, пісковиків, алевролітів і аргілітів, металів і сплавів мають певні дискретні значення: 0,64; 1,0; 1,5; 1,8; 2,25; 2,6; 3,0; 3,7; 4,6; 5,8; 6,3; 7,0; 8,3; 9,7; 11,2; 12,7; 13,7; 14,5; 16,3%, що свідчить про структурно-фазові переходи другого роду.

Що ж стосується змін приросту деформацій в процесі деформування і руйнування, то практично для всіх порід, видів напруженого стану і величин кульового тензору напружень залеж-

ності подібні. Тому доцільно пошук передвісників руйнування здійснювати шляхом дослідження змін приросту деформацій в процесі навантаження.

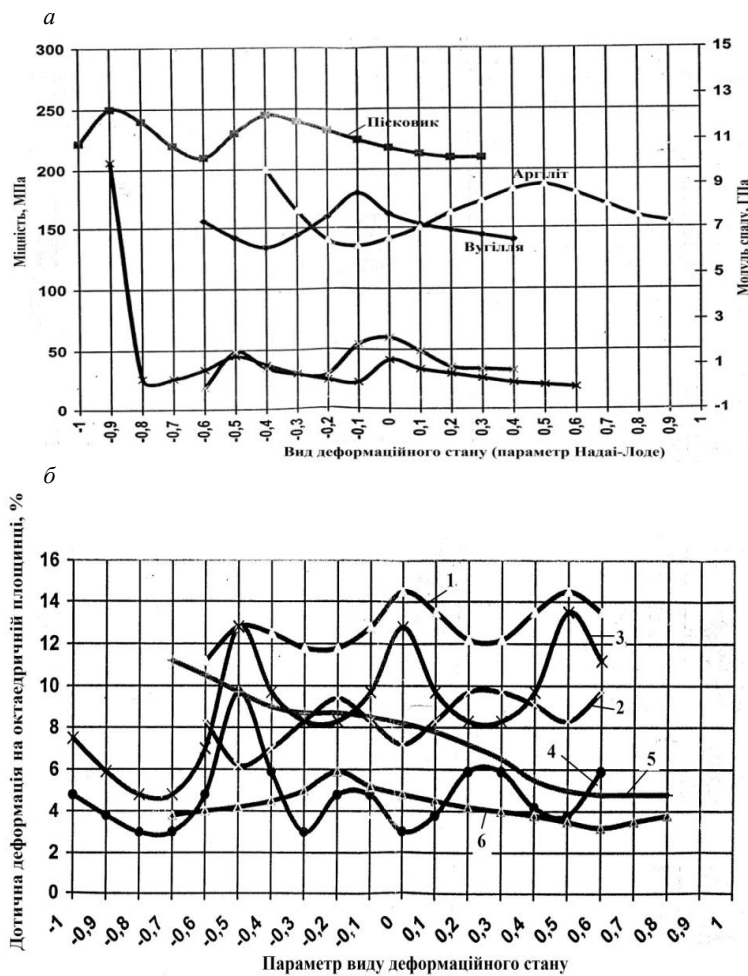


Рис. 2. Залежність міцності (а) і руйнуючої зсувної деформації вугілля і вмшуючи порід (б) від виду деформаційного стану при $\sigma_3 = 20$ МПа : 1, 2 – повна і гранична деформація вугілля; 3, 4 – повна і гранична деформація пісковика; 5, 6 – повна і гранична деформація аргіліту

На рис. 3, 4 для прикладу наведені дані зміни приросту об'ємних, зсувних і лінійних відносних деформацій в процесі навантаження зразка вугілля і пісковика при різних видах напруженого стану. Одні і ті ж дані наведені як при абсолютних, так і відносних значеннях максимального навантаження.

Аналізуючи наведені дані слід констатувати, що процес деформування гірських порід при механічному навантаженні в умовах нерівнокомпонентного триосного стискання можна розділити на чотири етапи:

а) інтенсивне зменшення об'єму на початковій стадії деформування практично без зміни форми (при навантаженнях до 0,3-0,4 від руйнуючих);

б) зменшення приросту об'ємної деформації до нуля (досягнення порогу дилатансії або точніше межі стискання), коливання приросту решти деформацій з амплітудою не більше 0,5% (при навантаженнях до 0,6-0,75 від руйнуючих);

в) різке зростання приросту зсувних, мінімальної і максимальної лінійних деформацій до кількох відсотків (при навантаженнях 0,85-0,99 від руйнуючих);

г) інверсія приросту всіх видів деформацій і динамічне руйнування породи з різким спадом навантаження (спостерігається практично перед руйнуванням при 0,99 від руйнуючого навантаження). При відсутності спаду навантаження відбувається пластичний коливальний зсувний процес (течія).

Наявність третього етапу, при якому амплітуда приросту лінійних і зсувних деформацій зростає в кілька разів (від десятих часток відсотка до кількох відсотків) свідчить про наявність резонансних явищ. З цього приводу доцільно згадати концепцію вихро-хвильового резонансу, що розвивається в роботах [7-12].

Згідно з цією концепцією при механічному навантаженні гірських порід відбувається перерозподіл енергії з реалізацією як трансляційних, так і поворотних мод. При цьому виникають як ліво-, так і правосторонні обертання, на резонансі відбувається перехід правосторонньої поляризації у лівосторонню і «викид» накопиченої в гірському масиві хвильової енергії. Ротаційний характер зсувних деформацій в гірських породах в об'ємному полі стискаючих напружень підтверджено в [9].

Виділяють наступні форми вихро-хвильових і структурних резонансів:
резонанс по швидкості і частоті – резонансне збудження системою, що коливається, лише однієї хвилі з можливого спектру хвиль в оточуючому середовищі;

резонанс по швидкості і розмірах – резонансне збудження хвиль системою, що коливається, коли характерні розміри системи або її структурного елементу близькі до розмірів коливальної системи або кратні їм;

подвійний вихро-хвильовий резонанс по швидкості, розмірах і параметрах вихрових структур;

структурний резонанс – резонансна взаємодія через середовище кількох несиметричних систем з межами розподілу або вихровими структурами.

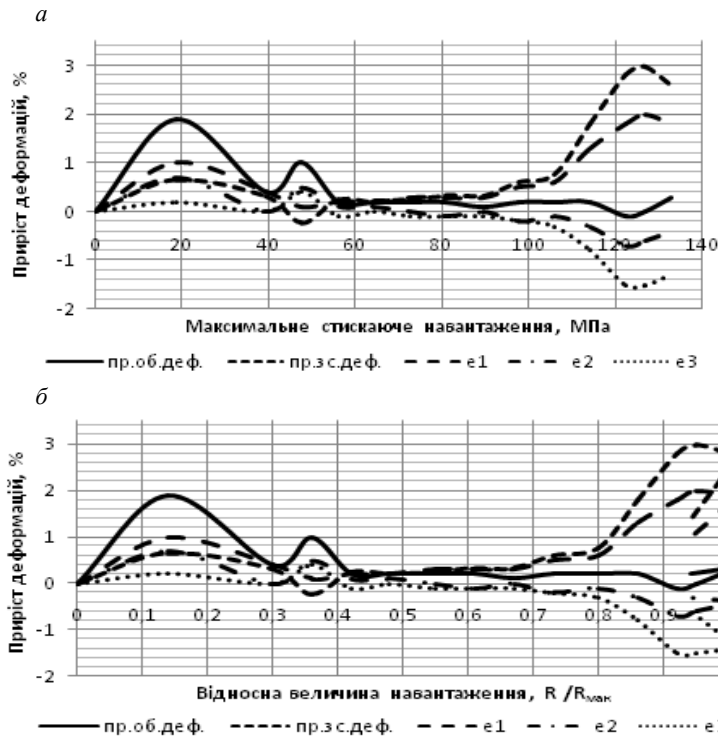


Рис. 3. Зміни приросту об'ємних, зсувних і лінійних деформацій в процесі навантаження зразка вугілля при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20 \text{ МПа}$ від абсолютної величини максимального стискаючого напруження (а) і відносної величини максимального навантаження (віднесене до руйнуючого) (б)

Критерієм для передбачення і прогнозу гео- і газодинамічних явищ є співпадіння або кратність довжин, швидкостей або частот хвиль, які взаємодіють між собою. Перша умова виконується за рахунок приблизної однаковості розмірів блоків в гірському масиві і одного модулю кратності при переході від одного масштабного рівня до іншого [13, 14]. При взаємодії будь-яких близько розташованих структур (шарів, блоків), що знаходяться в загальному

полі, через яке вони можуть впливати одне на одне, друга умова виконується автоматично.

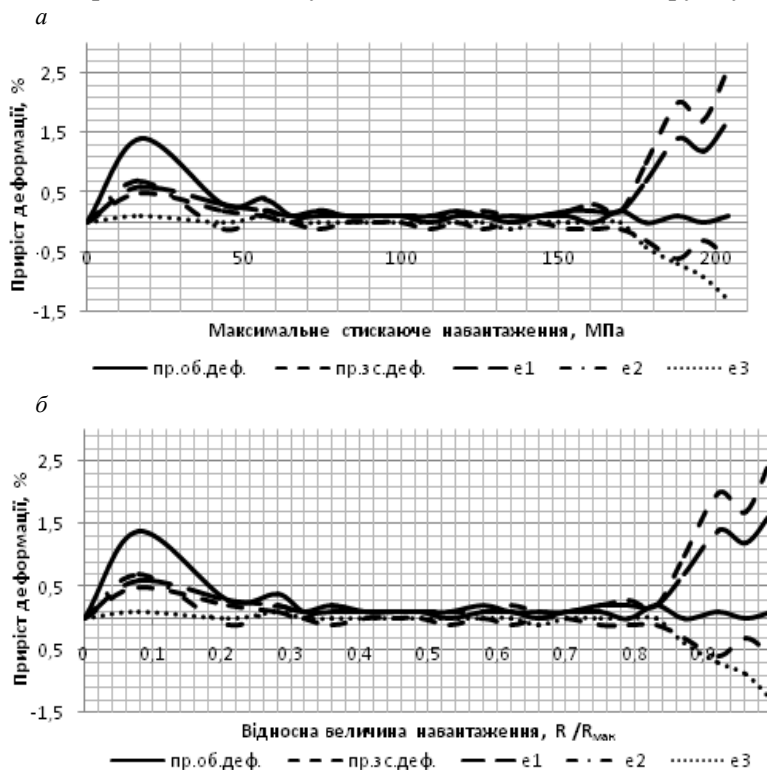


Рис. 4. Зміни приросту об'ємних, зсувних і лінійних деформацій в процесі навантаження зразка пісковика при $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, ($\sigma_2 = 23 \text{ МПа}$, $\sigma_3 = 9 \text{ МПа}$)

Згідно з [10, 11] зовнішнім навантаженням для Землі є Всесвітнє джерело хвильової енергії з періодом $T=160$ хв. Ця збуджуюча нульова частота коливань впливає на всі структурні об'єкти планети, які є резонаторами. Резонатор розглядається як вторинний випромінювач, амплітуда і фаза якого є функціями параметрів резонатору і збуджуючої частоти. Система джерело-резонатор є системою з одним ступенем свободи, яка має одну резонансну і одну антирезонансну частоту. Як показано в [12],

при нормальному падінні хвилі на межу розподілу шару-резонатору на частоті резонансу, розсіювання хвилі відсутнє і спостерігається повне пропускання хвилі. При цьому зв'язок між частотою, характерним розміром резонатору і швидкістю хвилі наступний

$$f_{\text{мк}} = \frac{V_p}{2\ell} k, \quad (1)$$

де V_p – швидкість поздовжньої складової об'ємної хвилі; ℓ – характерний розмір шару, блоку (для шару – товщина); k – порядок гармоніки.

Резонанс спостерігається в будь-яких матеріалах, на всіх гармоніках, йде на поздовжніх хвилях і є півхвильовим.

При частоті антирезонансу виникає зовсім протилежний ефект – так зване акустичне резонансне поглинання (АРП). При цьому зв'язок між частотою, характерним розміром резонатору і швидкістю хвилі наступний

$$f_{\text{а}} = \frac{V_s}{\ell} k, \quad (2)$$

де V_s – швидкість поперечної складової об'ємної хвилі.

При ефекті АРП спостерігається часткове віддзеркалення хвилі, а решта – поглинається шаром-резонатором і перетворюється на його власні коливання, які не виходять за межі шару, а поширюються вздовж його меж без затухання. Ефект АРП спостерігається тільки на непарних гармоніках, йде на поперечних хвилях і є хвильовим, а траєкторія руху часток має ротаційний (вихровий) характер.

Таким чином, хвильова взаємодія розпадається на два рухи: активний вихровий рух на частоті власних коливань структурної складової гірського масиву і реактивний пульсуючий, як реакція на зовнішню складову об'ємної хвилі, що входить з усіх боків. Під зовнішнім всестороннім пульсуючим тиском в середовищі утворюється об'ємна пластична хвиля, швидкість якої

$$V_n = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (3)$$

де K – модуль об'ємного стискування; ρ – щільність породи.

Швидкість поперечної хвилі власних коливань складає

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (4)$$

де G – модуль зсуву.

Для виникнення резонансу, як показано вище, ці швидкості повинні зрівнятися, а це можливо, коли модуль об'ємного стискування пройде через безкінечність і зрівняється з модулем зсуву.

Для прикладу на рис. 5, 6 показано зміну пружних параметрів вугілля і пісковику при різних напружених станах.

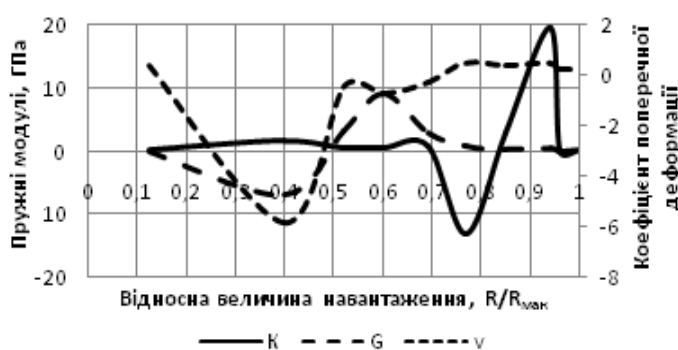


Рис. 5. Зміна пружних параметрів в процесі навантаження для вугілля при $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ($\sigma_2 = 23 \text{ МПа}$, $\sigma_3 = 9 \text{ МПа}$)

Наведені дані свідчать про те, що вугілля і пісковик є класичними ауксетиками, мають від'ємний коефіцієнт поперечної деформації, модуль зсуву до межі стискування періодично змінюється, проходячи в пісковиках через точку біфуркації ($-\infty$), а після досягнення межі стискування поступово зменшується до антирезонансної величини.

Модуль об'ємного стискування періодично змінюється до межі стискування, на межі стискування різко зростає, часто проходячи через точку біфуркації ($+\infty$), а після точки біфуркації різко зменшується, приймаючи від'ємні значення.

В процесі навантаження модулі зрівнюються кілька разів (наступає резонанс по швидкості), але до межі стискування це відбувається при протифазній зміні модулів і відбувається паралельний резонанс в режимі монохроматора (течія під дією об'ємної складової деформаційного поля). Лише після біфуркації модуля всестороннього стискування обидва модуля зрівнюються при синфазному зменшенні і наступає антирезонанс в режимі АРП з різким зростанням амплітуди деформації (на величину добротності, яка в породах досягає 100). Модуль зсуву стає бі-

льшим модуля об'ємного стискання (швидкість переміщення часток речовини перевищує швидкість звуку) і виникає ударна хвиля і динамічне руйнування.

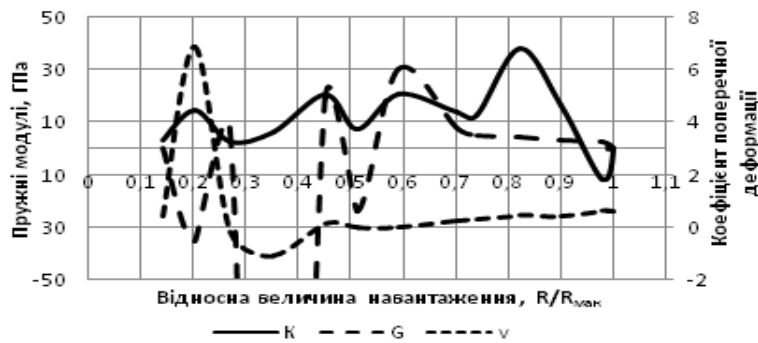


Рис. 6. Зміна пружних параметрів в процесі навантаження для пісковику при $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ($\sigma_1 = 35 \text{ МПа}$; $\sigma_2 = 20 \text{ МПа}$)

Висновки та напрямок подальших досліджень. Таким чином, головною причиною руйнування гірських порід є резонансні явища по швидкості, розмірах і частоті. В режимі монохроматору руйнування

йде у вигляді течії, в режимі АРП – в режимі динамічного руйнування.

В якості передвісника гео- і газодинамічних явищ пропонується третій етап процесу деформування гірських порід – різке резонансне зростання амплітуди приросту мінімальної (висування вибою) і максимальної (опускання покрівлі) деформацій, які можна зафіксувати лазерним дальноміром або сканером з точністю $\pm 3 \text{ мм}$.

Список літератури

1. Куксенко В.С., Гузев М.А., Макаров В.В., Рассказов И.Ю. Концепция сильного сжатия горных пород и массивов. Вестник Дальневосточного государственного технического университета. - 2011. - №3/4 (8/9). - С.14-58.
2. Адушкин В.В., Опарин В.Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. III. ФТПРПИ. - 2014. - №4. - С.10-38.
3. Викулин А.В. Новый тип упругих ротационных волн в геосреде и вихревая геодинамика. Геодинамика и тектонофизика. Т.1. 2010. №2. С.119-141.
4. Алексеев А.Д. 394692 СССР, МКИ G 01n3/08. Установка для испытания призматических образцов на трехосное сжатие. А.Д. Алексеев, Е.И. Осыка, А.Л. Годосейчук. Открытия. Изобретения, 1973. - №34. - С.139.
5. Рязанцев А.Н. Структурно-фазовые переходы в горных породах и соответствие относительных деформаций на микро- и макроуровнях. Физикотехнические проблемы горного производства. Донецк: ИФГП НАН Украины, Вып.15. 2012. - С.42- 54.
6. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел [Текст] /Дж. Ф. Белл/В 2-х частях. Часть II. Конечные деформации: Пер.с англ. под ред. А.П. Филина.М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит.-ры. - 1984. - 432 с.
7. Панин В.Е., Егорушкин В. Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д. Природа локализации пластической деформации твердых тел. ЖТФ. Т.77.вып.8. 2007. - С.62-69.
8. Басин М.А. Волны. Кванты. События. Волновая теория взаимодействия структур и систем. Ч.1. .СПб.: Норма. 2000. – 168 с.
9. Рязанцев А.Н., Стариков Г.П. Ротационные деформации в горных породах. Физико-технические проблемы горного производства. - Вып.16. - 2013. - С.119-125.
10. Кумченко Я. А. Альтернативная резонаторная теория силовых взаимодействий в макромире: устойчивость Вселенной и ее энергетика на примере Солнечной системы. Зб. робіт конференції «Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики». Кривий Ріг. - 2002. Т.2. -С.103-108.
11. Кумченко Я. А. Технология и обоснование необходимости мониторинга космической погоды для прогнозирования локальных земных катастроф. Авиационно-космическая техника и технология. №4 (61).2009. С.95-103.
12. Гликман А. Г. Эффект акустического резонансного поглощения (АРП) как основа новой парадигмы теории поля упругих колебаний. Геофизика XXI столетия: 2003-2004 годы. Сб. трудов Пярых и Шестых геофизических чтений. В.В. Федынского. М., Тверь: ООО «Издательство ГЕРС». - 2005. - С. 293-299.
13. Опарин В.Н., Танайло А.С. Представление размеров естественных отдельностей горных пород в канонической шкале. Классификация. ФТПРПИ. - 2009. - №6. - С.40-53.
14. Макаров П.В. Об иерархической природе деформации и разрушении твердых тел. Физическая мезомеханика. - 2004. Т.7. - №4. - С.25-34.
15. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003.- 270 с.

Рукопис подано до редакції 06.04.2018