

ЗАСТОСУВАННЯ ІМПУЛЬСНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИХОВАНИХ ТРІЩИН ТА СТРУКТУРНИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ БЛОКІВ З ОБЛИЦІОВАЛЬНОГО КАМЕНЮ

(Представлено д.геол.н., проф. Підвисоцьким В.Т.)

Проведено аналіз імпульсних ультразвукових методів при визначенні прихованих тріщин та структурних особливостей у зразках гірських порід. Визначено параметри та раціональні розміри зразків гірських порід, що забезпечують достатню точність ультразвукових досліджень.

Вступ. Актуальність проблеми. Знання фізико-механічних характеристик гірських порід необхідні для розрахунку та конструювання гірничих машин і механізмів, встановлення режимів їх роботи, обґрунтування параметрів вибухових робіт, оцінки стійкості масивів та бортів гірничих виробок.

При вивченні фізико-механічних властивостей гірських порід можуть бути використані два способи досліджень: статичний і динамічний.

В гірничій практиці найбільшого поширення одержали статичні методи дослідження гірських порід. Незважаючи на деякі переваги вони є досить трудомісткі, потребують потужного обладнання, детальної підготовки зразків для дослідження. Одержані при цьому значення пружних параметрів і деякі інші показники багато в чому залежать від розмірів і форми зразків, умов проведення дослідів та інших факторів.

Подолати ці недоліки значною мірою дозволяють динамічні способи досліджень, зокрема, звукові, до яких відносяться як ультразвукові, так і власне звукові методи.

Завдяки успішному розвитку електроніки, акустики та інших галузей сучасної науки, ці методи дослідження фізико-механічних властивостей та структурних особливостей гірських порід все впевненіше починають конкурувати з статичними методами, а в ряді випадків є єдиноможливими.

Застосування ультразвукових методів при дослідженні гірських порід дозволяє значно розширити коло питань, пов'язаних з вивченням фізичних властивостей та структурних особливостей гірських порід. Головним питанням, яке успішно можна вирішити, за допомогою ультразвукових методів дослідження гірських порід є вивчення внутрішньої структури гірських порід і її взаємозв'язок з акустичними характеристиками, вплив внутрішньої будови гірських порід на анізотропію властивостей та інші питання. Як фізичну характеристику в дослідженнях приймається швидкість розповсюдження повздовжніх хвиль у зразках гірських порід.

Всі ультразвукові методи вивчення властивостей гірських порід поділяються на резонансні та імпульсні. **Метою** даного дослідження є аналіз застосування саме імпульсних ультразвукових методів, що дозволяють визначити швидкості розповсюдження та затухання повздовжніх, поперечних та поверхневих хвиль у зразках гірничих порід.

Імпульсний ультразвуковий метод використовує досить складну електронну апаратуру, але даний спосіб має ряд суттєвих переваг: дозволяє проводити виміри у великому діапазоні частот; процес вимірювання простий і займає мало часу; точність методу досить висока.

Імпульсний ультразвуковий метод дозволяє проводити ряд вимірювань, які складно здійснити при статичних методах дослідження. Так, наприклад, можна провести вимірювання швидкостей розповсюдження пружних хвиль (a , відповідно, і пружних параметрів гірських порід) при високих температурах зразка, досліджувати залежності пружних характеристик при різних напружених станах зразка гірської породи.

Постановка завдань досліджень. До основних завдань даного дослідження належать: проведення аналізу імпульсних ультразвукових методів при визначенні прихованих тріщин та структурних особливостей у зразках гірських порід; дослідження параметрів та раціональних розмірів зразків гірських порід при застосуванні ультразвукового методу дослідження внутрішньої структури гірських порід; визначення швидкості розповсюдження пружних хвиль залежно від виду гірської породи на основі вивчення годографів хвиль.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Всі звукові та ультразвукові методи дослідження оснований на фізичному явищі поширення пружних хвиль у гірських породах під дією звукових або ультразвукових коливань. Виникнення та поширення акустичних коливань у гірських породах проходить так само як і в будь-якому твердому тілі. Вивченням даного питання займалися такі вчені: В.В. Ржевський, В.С. Ямщев, О.І. Баюк [1], які першими розробили методику та обґрунтували необхідні параметри використання ультразвукових та звукових методів при дослідженні гірських порід. У

подальшому вдосконалення методики використання даного методу викладене в працях таких вчених, як О.І. Силаєва, О.І. Бабіков, М.П. Волярович [2, 4].

Використання даного методу при дослідженні гірських порід зацікавило також іноземних вчених, які вивчали фізику твердого тіла, зокрема Р.Труелл, Ч.Ельбаум, Б.Чик [3] та дослідили в своїх працях теоретичну основу використання методів ультразвукового дослідження гірських порід. З удосконаленням технічного прогресу з'явилися покращені апаратні можливості для використання даного методу, а це сприяє подальшій перспективі його розвитку, як одного з найефективніших неруйнівних методів при дослідженні внутрішньої структури та механічних властивостей гірських порід.

Викладення основного матеріалу дослідження. Суть імпульсного ультразвукового методу вимірювання швидкості розповсюдження пружних хвиль в зразках гірських порід полягає в наступному. У досліджуваному середовищі безперервно випромінюється у вигляді короткого «пакета» ультразвукові імпульси. Вони приймаються, підсилюються і подаються на індикатор, за допомогою якого вимірюється час розповсюдження імпульсу для випадків, коли перетворювачі знаходяться в контакті один з одним та коли вони розділені досліджуваним середовищем. За часом проходження ультразвукового імпульсу крізь досліджуване середовище при відомій відстані між п'єзоперетворювачами можна визначити швидкості розповсюдження повздовжньої або поперечної хвилі в зразку. Коли пружні властивості досліджуваного середовища змінюються, то змінюється і час проходження ультразвукового імпульсу через нього, а відповідно, і швидкість розповсюдження пружної хвилі теж змінюється.

Імпульсні ультразвукові методи визначення швидкості розповсюдження пружних хвиль в зразку, поділяються (рис. 1) на: *a* – метод прозвучування; *б* – метод повздовжнього профілювання; *в* – метод кратних відбиттів (ехо-метод).

При методі прозвучування випромінювач і приймач розташовуються на протилежних торцевих сторонах досліджуваного зразка. Час розповсюдження повздовжньої хвилі визначається, як проміжок між зондуєчим імпульсом та входженням імпульсу, що надходить.

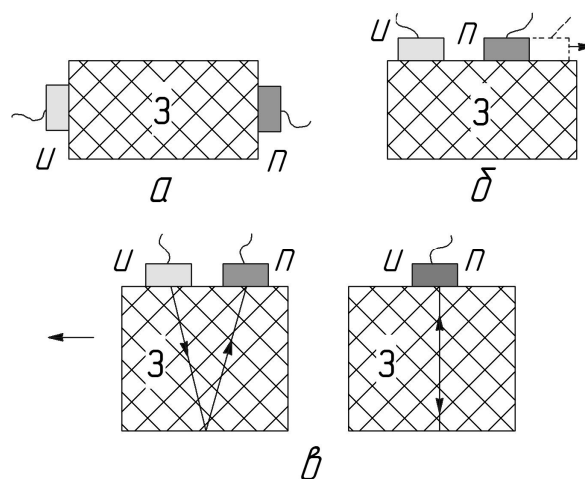


Рис. 1. Імпульсні ультразвукові методи визначення швидкості розповсюдження пружних хвиль в зразку:
a – метод прозвучування; *б* – метод повздовжнього профілювання;
в – метод кратних відбиттів (ехо-метод)

Поява на дисплеї складної картини із різних хвиль пояснюється тим, що п'єзоперетворювачі, притиснені або приклеєні до торців зразка, мають обмежену поверхню. З цієї причини, створюються деякі розходження ультразвукового пучка повздовжньої хвилі L в зразку (рис. 2) і падіння її під деяким кутом α на бокові стінки. В результаті чого всередині зразка крім повздовжньої хвилі L , що відбивається під таким же кутом, виникає поперечна хвиля T , що має кут відбиття β ($\beta < \alpha$) і розповсюджується в зразку зі швидкістю c_T .

Поперечна хвиля T відбиваючись від протилежної бокової сторони, також перерозподіляється на повздовжню і поперечну та ін. На екрані дисплея, що показує появу повздовжньої хвилі, виникають і побічні сигнали від інших хвиль. Таким чином, поведінка повздовжніх хвиль при проходженні через зразок дає можливість фіксувати і поперечні хвилі в зразках ізотропних гірських порід, для яких визначення швидкості поперечних хвиль в даному випадку є більш складним.

Інколи при застосуванні даного методу для визначення дуже пористих порід, в яких швидкості повздовжніх і поперечних хвиль різко відрізняються між собою, використовують п'єзоперетворювачі, що вводять поперечні коливання (зазвичай кристали сегнетової солі прямого зрізу). При цьому на графіках

спостерігається достатньо чітка різниця при початковій фазі повздовжньої і поперечної хвиль, так як амплітуда в поперечній хвилі буде значно більшою. Точність визначення швидкості розповсюдження пружних хвиль в зразках гірських порід по методу прозвучування обумовлюється: 1) похибкою визначення довжини зразка (або точніше, відстанню між перетворювачами); 2) похибкою вимірювання часу розповсюдження ультразвукової хвилі через зразок. Похибка визначення швидкості $(\Delta c)_l$ залежно від помилки вимірювання довжини зразка Δl рівна:

$$(\Delta c)_l = \frac{\Delta l}{t}. \quad (1)$$

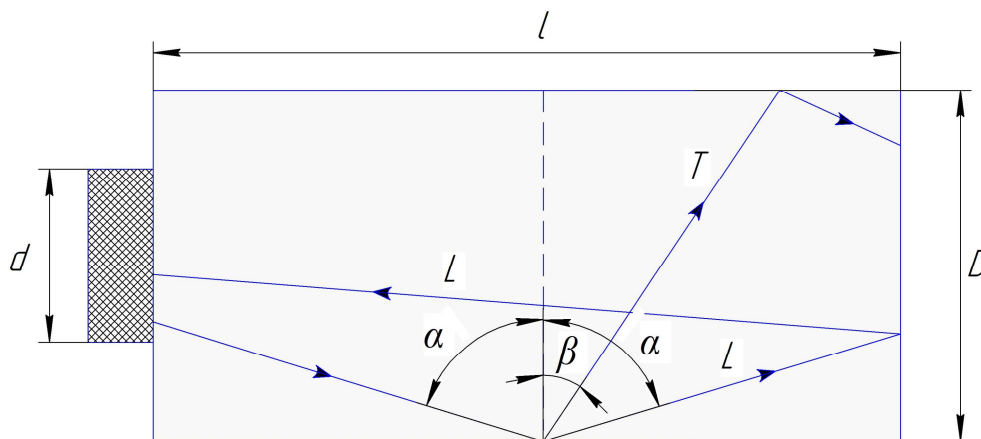


Рис. 2. Схема поширення ультразвуку в зразку гірської породи

Якщо вважати, що довжина зразка вимірюється за допомогою штангенциркуля з точністю до 0,1 мм, то похибка визначення швидкості буде досить незначна і нею можна знехтувати. Основна похибка визначення швидкості обумовлена неточністю визначення часу розповсюдження хвилі Δt . При цьому похибка вимірювання визначається за формулою:

$$(\Delta c)_t = \frac{l}{t^2} \Delta t = c \frac{\Delta t}{t}, \quad (2)$$

де l – база вимірювання, см; t – час розповсюдження хвилі, мксек.

Звідки видно, що визначення швидкості розповсюдження буде тим точнішою, чим буде довший зразок гірської породи, що досліджується; швидкість в породах більш міцних визначається при рівних умовах дослідження з меншою точністю.

Широке розповсюдження одержала для вивчення швидкостей пружних хвиль методика повздовжнього профілювання, що застосовувалась раніше в лабораторних умовах при моделюванні сейсмічних явищ. При методі повздовжнього профілювання всі точки випромінювання і прийому розташовуються на одній і тій же прямій-профілю спостереження. Випромінювач встановлюється нерухомо на одному кінці профілю, а приймач поступово переміщується вздовж вибраного профілю на досліджуваному зразку гірської породи.

В основу методики фіксації пружних хвиль, що надходять, в даному методі покладені не одиничні вимірювання часу, початкової фази хвиль, а принцип фазової кореляції початкової фази хвилі при визначених положеннях випромінювача і приймача коливань. При цьому створюється можливість фіксації не тільки початкових фаз повздовжньої хвилі, але і контролювати амплітуду і форму коливань, а також спостерігати хвилі, що надходять не першими.

Швидкості розповсюдження пружних хвиль визначаються по годографам хвиль, які будуються із одержаних сейсмограм. Приклад годографів хвиль показаний на рисунку 3. Даний метод дозволяє визначати в циліндричних зразках повздовжню і поверхневу релейну хвилі, що на сейсмограмах мають найбільші амплітуди.

Як правило, профілем спостереження слугує твірна циліндричного або призматичного зразка гірської породи.

Довжину профілю спостереження доцільно приймати рівній довжині зразка. Тоді випромінювач ультразвукових коливань встановлюється на профілі нерухомо на одному кінці зразка, а приймач переміщується по профілю з постійним кроком (наприклад, 1 або 2 см). Перетворювачі в цьому випадку встановлюються на зразку за допомогою спеціальних тримачів.

Метод повздовжнього профілювання на відміну від методу прозвучування, дозволяє спостерігати зміну швидкостей розповсюдження пружних хвиль по всій довжині зразка і виявити ділянки цих порушень. Методика повздовжнього профілювання складніша, ніж методика прозвучування, але має широкі можливості.

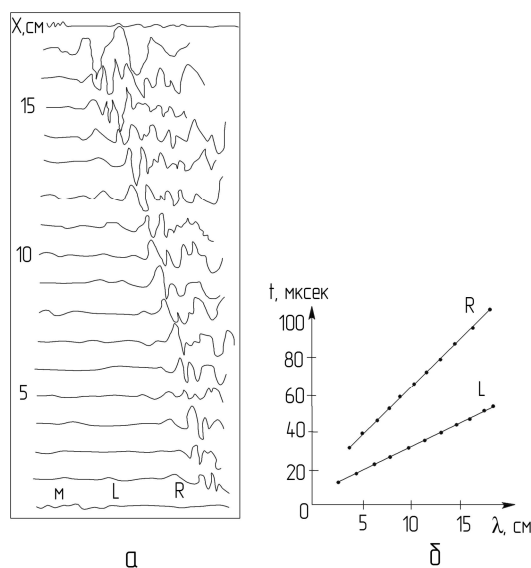


Рис. 3. Годографи хвиль, що одержані методом повздовжнього профілювання в зразку гірської породи (за О.І. Силаєвою)

Оцінка точності визначення швидкості по годографам може бути визначена за формулою:

$$\frac{\delta c}{c} = \delta t = \frac{c\sqrt{12}}{\sqrt{\frac{l}{d}(l+d)(l+2d)}}, \quad (3)$$

де c – швидкість розповсюдження пружної хвилі, м/с; δc – ймовірна похибка вимірювання швидкості, м/с; d – крок вимірювання, см; l – довжина (база) зразка, см; δt – відхилення часу проходження хвилі від прямої, мксек.

Формула (3) виражає допустиму відносну похибку $\frac{\delta c}{c}$ визначення швидкості залежно від довжини зразка. Точність визначення швидкості розповсюдження хвиль методом повздовжнього профілювання зростає зі збільшенням довжини зразка і зменшенням кроку вимірювань, що рівносильно збільшенню точок профілю.

З використанням імпульсних ультразвукових приладів помилка вимірювання швидкості складає в середньому 1–2 %, тобто є меншою, ніж при використанні метода прозвучування.

Менше розповсюдження з метою дослідження гірських порід отримав ехо-метод, який широко використовується в ультразвуковій дефектоскопії та дослідженні порушення цілісності зразків гірських порід. Основною його перевагою є те, що цей метод дозволяє вести дослідження при доступі до зразка тільки з однієї сторони, тобто при розташуванні п'єзоперетворювачів (або одного перетворювача, що виконує функції випромінювача в приймач) на одному торці досліджуваного зразка. В цьому випадку швидкість розповсюдження пружних хвиль визначається за виразом:

$$c = \frac{2l}{t}, \quad (4)$$

де l – довжина зразка, тобто шлях, що проходить ультразвуковий пучок від випромінюючої до відбиваючої поверхні зразка; t – час розповсюдження імпульсу.

Але не дивлячись на незручності даного методу, пов'язані з одностороннім доступом до досліджуваного зразка, ехо-метод потребує якісної обробки відбиваючої поверхні зразка, так як велика шорсткість тильної поверхні заважає одержанню чіткого відбиття сигналу. Ехо-метод дозволяє зменшити розміри досліджуваних зразків і підвищити точність вимірювань.

Одним із найважливіших питань, пов'язаних із застосуванням імпульсних методів, є вибір раціональних розмірів зразків гірських порід. Необхідність спеціального розгляду цього питання пояснюється тим, що при довільному виборі розмірів зразків складно зробити висновок при аналізі

результатів досліджень: які саме швидкості повздовжніх хвиль були виміряні в безмежному середовищі (c_L) або ж в стрижні (c_D).

Так як у лабораторних умовах вимірювання швидкості розповсюдження повздовжніх хвиль проводиться на менших за розмірами блоках, то необхідно вибирати такі розміри зразків гірських порід, у яких при мінімальних співвідношеннях поперечних розмірів до довжини хвилі, одержані значення швидкостей розповсюдження пружних, повздовжніх хвиль у зразках гірських порід можна було б вважати швидкостями розповсюдження повздовжніх хвиль у безмежному середовищі (в масиві).

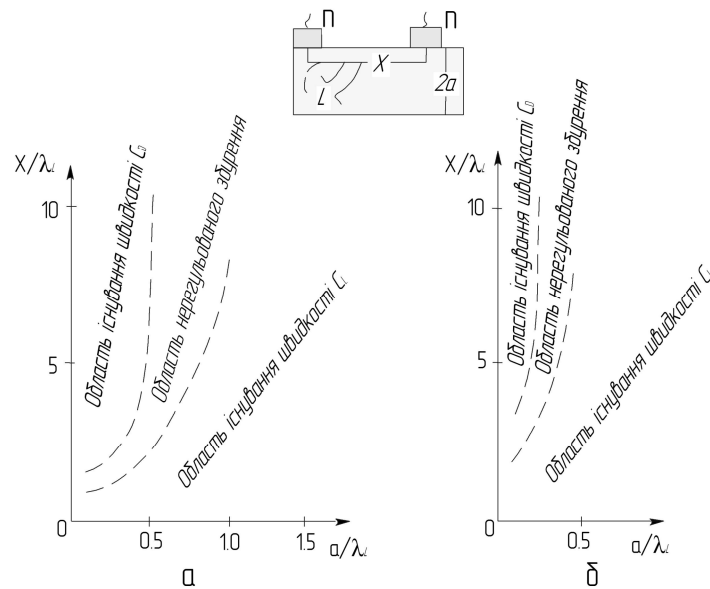


Рис. 4. Області прослідкування різних повздовжніх пружних хвиль в зразку гірської породи (за О.І. Силаєвою): а – металевий стрижень; б – стрижень із вапняку

Дослідження, проведені в Інституті фізики Землі ім. О.Ю. Шмідта показали, що області існування повздовжніх хвиль c_L і c_D досить просто виділяються при різних співвідношеннях радіуса зразка до довжини ультразвукової хвилі. Результати досліджень представлені у вигляді зведених графіків на рисунку 4. На графіках показано області простеження повздовжніх хвиль, що розповсюджуються зі швидкостями в безмежному середовищі – c_L і в стрижні c_D , залежно від відносної відстані між перетворювачами x/λ і відносного поперечного розміру досліджуваного зразка a/λ (a – радіус зразка).

Межа між областями існування швидкостей c_L і c_D є умовною, так як повздовжні хвилі, що розповсюджуються зі швидкістю c_L в безмежному середовищі, існують і в області швидкості c_D . Такий же умовний характер мають і межа області для швидкості c_D .

Висновки. Таким чином, аналіз сучасного стану ультразвукових і звукових методів дослідження гірських порід показує, що вони мають досить широку перспективу подальшого розвитку і реалізації як в теоретичних дослідженнях, так і в практиці гірничої справи. Експериментальні дані показують, що для одержання на екрані індикатора чітко вираженої повздовжньої хвилі, що розповсюджується зі швидкістю c_D в стрижні, необхідно підбирати співвідношення радіуса зразка гірської породи за довжиною хвилі не більшим 0,2–0,3, тобто $a/\lambda < 0,2–0,3$. При співвідношенні $a/\lambda < 0,8–1,0$ одержуються швидкості розповсюдження повздовжньої хвилі в масиві.

При виборі раціональної довжини зразків для дослідження імпульсними методами приймається до уваги, в першу чергу, забезпечення великої точності вимірювання швидкостей розповсюдження хвиль. При цьому точний результат може бути отриманий при використанні більш довгого шляху проходження імпульсу, але при обов'язковому збереженні одночасно з цим сигналу достатньої амплітуди на індикаторі. Довжина досліджуваних зразків гірських порід приймається зазвичай: $l \gg (3–4)\lambda$.

При дослідженнях повинні застосовуватися зразки гірських порід без штучно створених мікротріщин, наявність яких викликає значні зміни значень швидкостей пружних хвиль. У випадку шорсткості торцевої поверхні між зразком і п'єзоперетворювачем утворюється проміжок з повітряними прошарками і енергія ультразвукового пучка більшою своєю частиною не проходить у досліджуваний зразок, а розсіюється по поверхні.

Для покращення акустичного контакту зразка із перетворювачами у випадках, коли нерівності і непаралельності торцевих поверхонь не перевищують часток довжини хвилі, застосовують зв'язуючий шар з хорошою провідністю ультразвукових хвиль, близький по акустичному опору до гірської породи. Як акустично зв'язуюче середовище можуть застосовуватися нафта, вода, гліцерин, крохмальний клей,

рідкі масла, кремнієва мастика, м'які пластики але найбільшого розповсюдження отримало трансформаторне масло.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Ямцегов В.С.* Ультразвуковые и звуковые методы исследования горных пород : учебник. – М. : Московский институт радиозлектроники и горной электромеханики, 1964. – 71 с.
2. *Бабиков А.И.* Ультразвук и его применение в промышленности. – М. : Физматгиз, 1988. – 214 с.
3. *Труэлл Р.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела : учебник / *Р.Труэлл, Ч.Эльбаум, Б.Чик.* – М. : Мир, 1972. – 304 с.
4. *Баяк Е.И.* Методика определения упругих параметров в образцах горных пород / *Е.И. Баяк.* – М. : Труды ИГЕМ, 1981. – Вып. 43. – 169 с.
5. *Дидык Р.П.* Физические основы прочности : учебник / *Р.П. Дидык, Е.В. Кузнецов, В.Н. Забара.* – Д. : Наука и образование, 2005. – 608 с.
6. *Дубровський В.П.* Фізико-технічні властивості гірських порід : навч. посібник / *В.П. Дубровський.* – Житомир : ЖІТІ, 2000. – 362 с.

МАХНО Артур Миколайович – аспірант кафедри геотехнологій ім. проф. М.Т. Бакка Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гірництво;
- сучасні невибухові методи видобування каменю;
- моделювання процесів гірничого виробництва.

Подано 19.05.2011

