

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОБРОБКИ
І АНАЛІЗУ АНІЗОТРОПІЇ АКУСТИЧНИХ ШВИДКОСТЕЙ
ПРУЖНИХ ХВИЛЬ ТА АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ
ПРИ ВИВЧЕННІ ТРІЩИНУВАТОСТІ**

А. П. ОНАНКО, В. О. АНДРУЩЕНКО, Г. Т. ПРОДАЙВОДА, Ю. А. ОНАНКО

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Київ, Україна
onanko@univ.kiev.ua*

Розроблена автоматизована система чисельного аналізу даних вимірювань параметрів анізотропії акустичних швидкостей, яка забезпечує урахування впливу будови текстур та їх упорядкованості. Запропоновано метод взаємного контролю результатів сейсмоакустичних та акустоемісійних досліджень. Проведено аналіз анізотропії швидкостей пружних хвиль деформованих зразків для оцінки їх деформаційних перетворень на основі експериментальних ультразвукових та акустоемісійних досліджень пружної анізотропії.

ВСТУП

Обробка даних ультразвукових (УЗ) вимірювань анізотропії акустичних швидкостей та поляризаційних характеристик пружних хвиль вимагає великих об'ємів чисельних розрахунків [1-4]. Акустична емісія (АЕ) дозволяють отримувати додаткову інформацію про процес тріщиноутворення. Характеристика джерела АЕ, текстура породи, речовинний склад визначають динаміку процесу локальної перебудови та тип АЕ – неперервну або дискретну [5]. Дана робота присвячена вивченню динаміки неоднорідного термічного впливу створеного потужним наносекундним рубіновим лазером.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для обчислення осереднених пружних постійних C_{ijkl} застосовується інваріантно-поляризаційний метод [6]. Його особливістю є те, що ітераційна система рівнянь включає не тільки невідомі пружні постійні, а і вектори пружних зміщень хвиль та обмеження на пружні постійні, що виникають із інваріантних величин тензору пружних постійних $\langle C_{ijkl} \rangle$.

**АЛГОРИТМ ОБРОБКИ ДАНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ
АНІЗОТРОПІЇ АКУСТИЧНИХ ШВИДКОСТЕЙ**

Принципову схему алгоритму роботи автоматизованої системи (АС) чисельного аналізу і візуалізації даних УЗ вимірювань параметрів анізотропії акустичних швидкостей V пружних хвиль в гранітоїдах представлено на рис. 1.

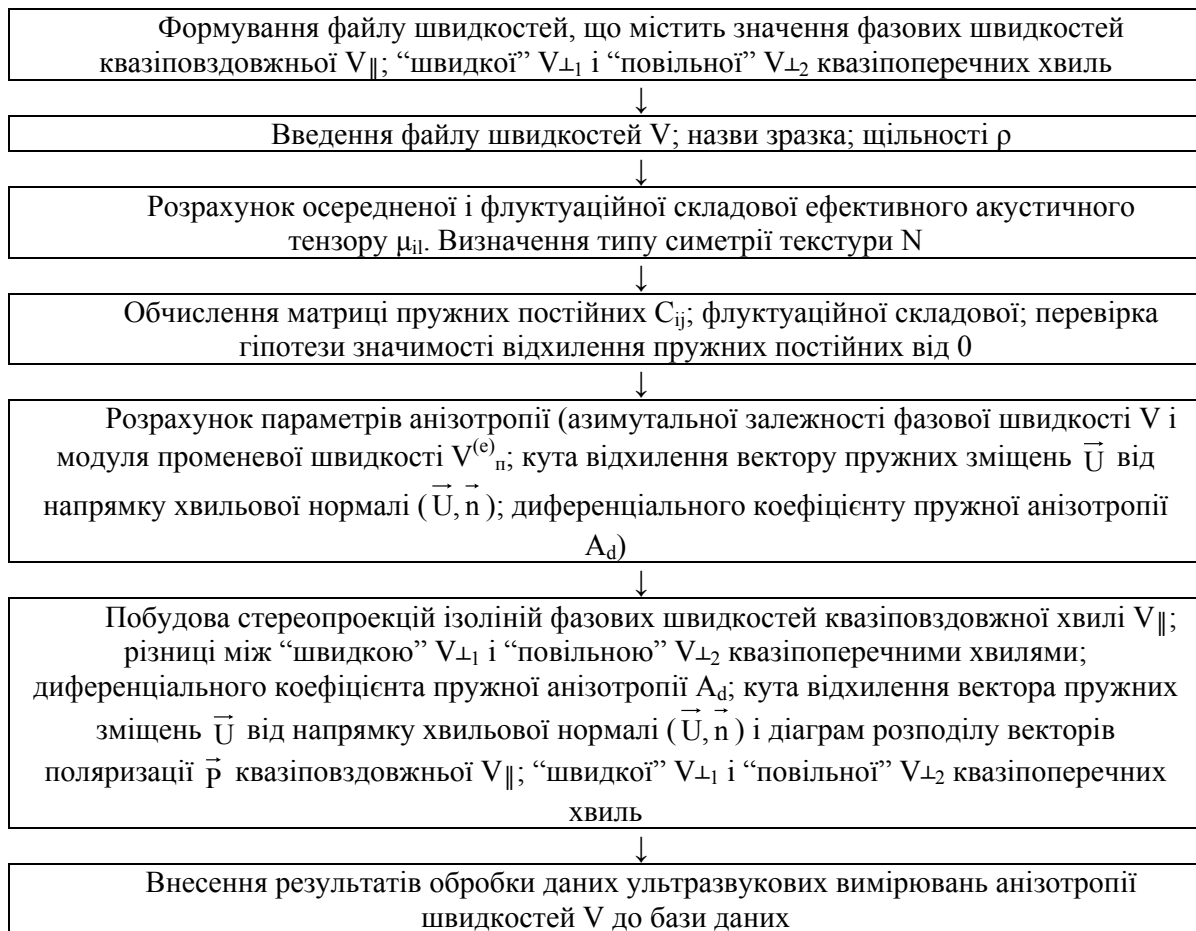


Рис. 1. Принципова блок-схема алгоритму роботи автоматизованої системи чисельного аналізу і візуалізації даних ультразвукових вимірювань параметрів анізотропії акустичних швидкостей V пружних хвиль.

База даних результатів обробки даних УЗ вимірювань анізотропії швидкостей містить: вичерпну інформацію про всі зразки, що присутні у базі даних, включаючи інформацію про екстремуми (мінімуми та максимуми) стереопроєкцій ізоліній фазових швидкостей квазіповздовжньої хвилі V_{\parallel} , різниці між "швидкою" і "повільною" квазіпоперечними хвилями $\Delta V_{\perp} = V_{\perp 1} - V_{\perp 2}$; диференціального коефіцієнту пружної анізотропії A_d , кута відхилення вектора пружних зміщень \vec{U} від напрямку хвильової нормалі (\vec{U}, \vec{n}) і діаграм розподілу векторів поляризації \vec{P} квазіповздовжньої V_{\parallel} , "швидкої" $V_{\perp 1}$ і "повільної" $V_{\perp 2}$ квазіпоперечних хвиль, а також назви папок, до яких зберігаються звіти з результатами обробки даних УЗ вимірювань анізотропії акустичних швидкостей. Ілюстрація вікна завершеного третього етапу обробки даних УЗ вимірювань анізотропії швидкостей V зображена на рис. 2.

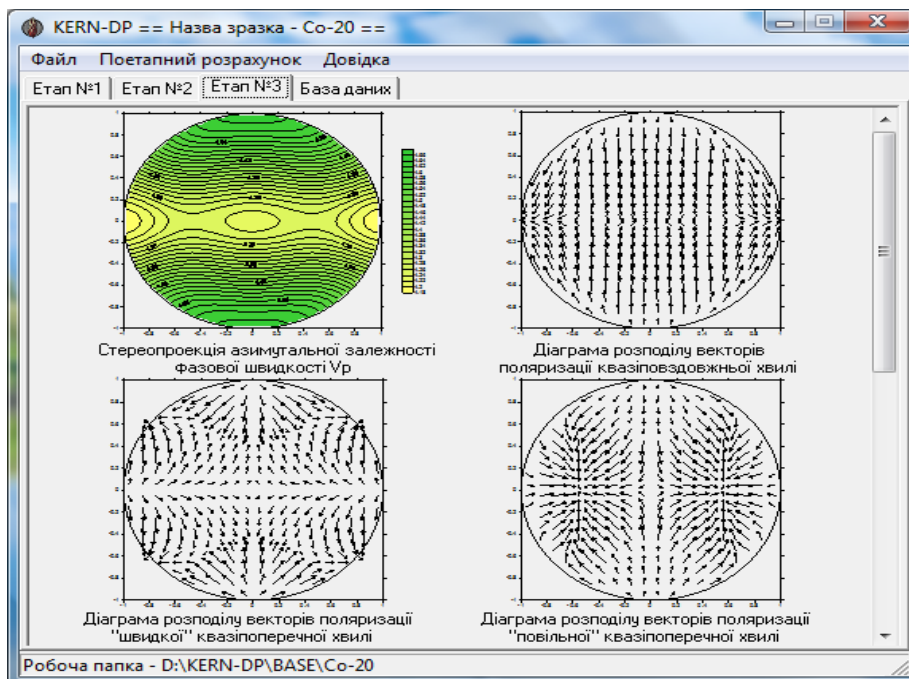


Рис. 2. Ілюстрація верхньої частини вікна завершеного третього етапу обробки даних ультразвукових вимірювань анізотропії швидкостей V .

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Зразки досліджуваних порід опромінювалися імпульсами рубінового лазера ($\tau \approx 20$ нсек) потужністю $P \approx 200$ МВт/см². Діаметр лазерної плями був менше площі зерен $D \approx 1$ мм у крупнозернистих і більше площі зерен у дрібнозернистих зразках. Поверхня досліджених зразків була сильно неоднорідна як за коефіцієнтом поглинання для заданої хвилі випромінювання лазера $\lambda = 695$ нм, так і за морфологією. Загальне підсилення реєструючої апаратури на основі спеціалізованого акустоемісійного приладу АФ-15 було $K = 60 \div 72$ дБ. Прибором УЗИС-КНУ на частотах $f_1 \approx 1,67$ МГц і $f_2 \approx 5$ МГц похибка вимірювання рівнялась $\frac{\Delta V}{V} = 0,5 \div 1,5\%$ в залежності від довжини зразка l_0 [7].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 3а наведена фотографія акустичного відгуку при опроміненні рубіновим лазером інтенсивністю $I \approx 300$ МВт/см² в крупнозернистий пісковик, що супроводжувалось створенням неоднорідних термомеханічних напруг з проплавом кратеру та викидом на поверхню зразка розплаву. Співставлення акустичного відгуку в крупнозернистому пісковикі, зображеному на рис. 3а, з часовим терміном дії імпульсу рубінового лазера інтенсивністю $I \approx 300$ МВт/см², зображеному на рис. 3б, та розмірами зразка вказують на формування 2-го та 3-го „максимумів” (накладених в часі імпульсів) через механізм АЕ, оскільки часові затримки їх появи та довжина кінцевого сформованого імпульсу не можуть бути пояснені в рамках фототермопружного механізму.

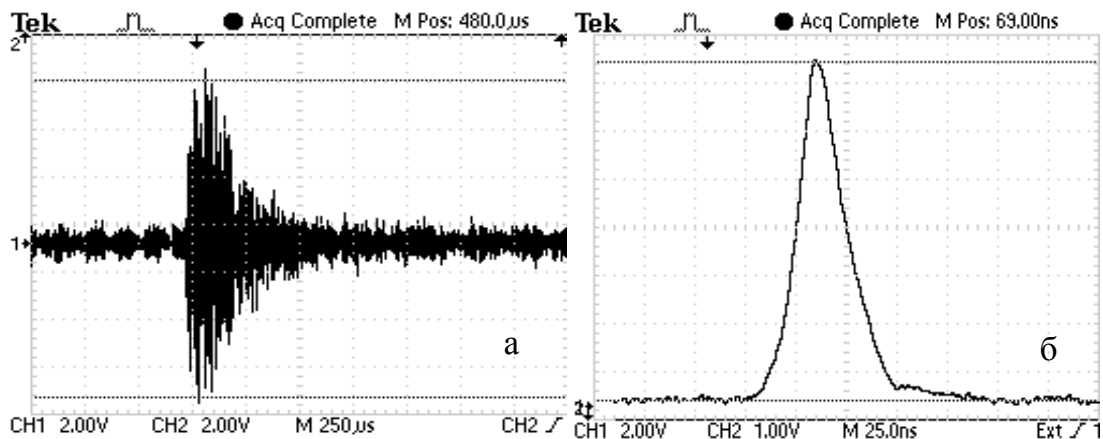


Рис. 3а. Опромінення в крупнозернистий пісковик лазером інтенсивністю $I \approx 300 \text{ МВт/см}^2$; 2 В/под, 250 мкс/под. Рис. 3б. Тривалість дії імпульсу рубінового лазера $\tau \approx 20 \text{ нс}$ з довжиною хвилі $\lambda = 694 \text{ нм}$.

Оскільки за умов експерименту фазові переходи при термічному впливі відбуваються достатньо швидко, за час, що може бути порівняний з часом лазерного впливу, то формування „акустемісійної частини” акустичного відгуку пов’язано саме із тріщиноутворенням. У загальному випадку при динамічній дії на породи виникає ієрархічна системи мікротріщин. Відомо, що амплітуда сигналів АЕ пропорційна як початковому розміру мікротріщин $U_{AE} \approx l_{тр}$, так і площі їх розкриття $U_{AE} \approx S_{тр}$ [8]. Якщо вважати, що перша стадія локального руйнування порід є, за своєю суттю, накопиченням невзаємодіючих тріщин першого рівня, то початкове джерело локального руйнування формується, коли концентрація мікротріщин у породі сягає значення $C_{кр}$, при якому середня відстань між локальними тріщинами \bar{l} більше їх середнього розміру \bar{l} в e разів:

$$\frac{\bar{l}}{\bar{l}} = \frac{1}{\sqrt[3]{C_{кр}}} = e. \quad (1)$$

При виконанні умови (1) тріщини починають збільшуватися, ініціюючи формування нових тріщин, які утворюють другий рівень. Середні розміри різних структурних неоднорідностей співвідносяться як $\frac{l_1}{l_2} = 2 \div 7$ (для гранітоїдів), причому середні розміри

мікротріщин на сусідніх ієрархічних рівнях розрізняються в $\frac{l_{M1}}{l_{M2}} \approx 3$ рази. Температура

Дебая θ_D визначалась за формулою[8]:

$$\theta_D = \frac{h}{k_B} \cdot \left(\frac{9N_A \rho}{4\pi A} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{1}{V_{||}^3} + \frac{2}{V_{\perp}^3} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

де $k_B = 1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ стала Больцмана, $h = 6,62617 \cdot 10^{-34} \text{ Дж·сек}$ стала Планка, $N_A = 6,02209 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ число Авогадро, A – середня молярна маса, ρ – густина, $V_{||}$ – повздовжня УЗ швидкість, V_{\perp} – поперечна УЗ швидкість, μ – коефіцієнт Пуассону.

$$\mu = \frac{1}{2} \frac{V_{II}^2 - V_{\perp}^2}{V_{II}^2 + V_{\perp}^2}. \quad (3)$$

На найнижчому ієрархічному рівні – “рівень мікротріщин” наймовірнішими причинами їх виникнення є локальні неоднорідності, які виникають у результаті концентрації напружень σ_i на обмежених ділянках внаслідок пружної анізотропії мінеральних складових. Наслідком цього є розвиток крихких порушень у вигляді тріщин сколювання. На рис. 4 зображені осцилограми імпульсів поперечної поляризації в підкладці Si + SiO₂.

А, у, о.

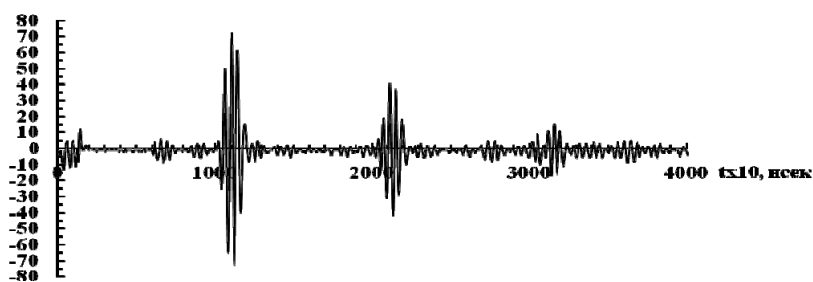


Рис. 4. Осцилограма імпульсів поперечної поляризації в підкладці Si + SiO₂.

Пружні E та непружні характеристики суттєво залежать від морфології приповерхневого шару. За допомогою 3D атомно-силової мікроскопії (АСМ) отримано зображення мікроструктури Si + SiO₂ орієнтації (100), що показано на рис. 5.

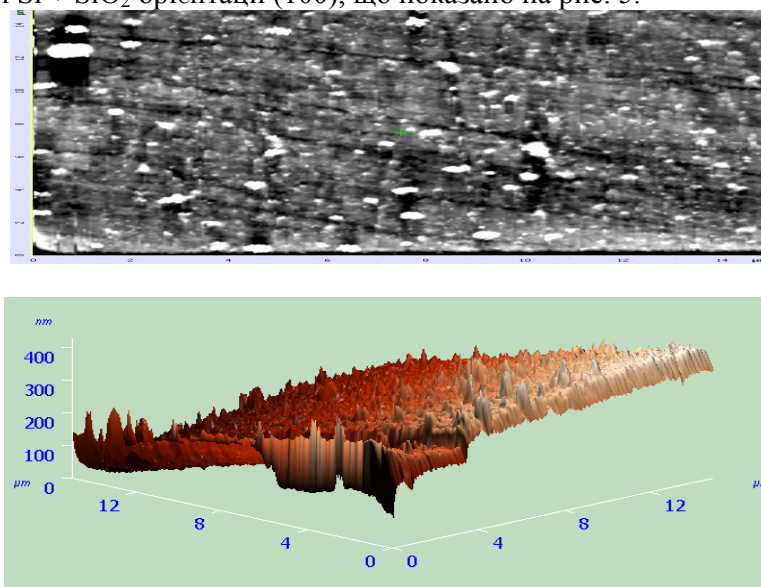


Рис. 5. 3D атомно-силова мікроскопія зображення мікроструктури Si + SiO₂ марки КДБ-6,0 орієнтації (100) (15x15 мкм).

АСМ засвідчує присутність рельєфу підкладці. При малій товщині плівки $h \leq 1000$ нм структурні дефекти не встигають заліковуватися.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено програма і алгоритм, які дозволяють у автоматизованому режимі проводити аналіз параметрів анізотропії пружних хвиль.
2. Дослідження АЕ є важливими для розвитку теорії пластичної деформації, при вивченні процесів утворення і розповсюдження мікротріщин, їх орієнтації і просторового розподілу, для здійснення неруйнівного контролю текстур.
3. Отримані результати стверджують єдиний методологічний підхід до дослідження анізотропії гірських порід та наближення теорії довжинохвильового кристала, згідно якої гранітоїди розглядають як квазіоднорідні анізотропні середовища.
4. Кут поляризації - відхилення вектора пружних зміщень \vec{U} від напрямку хвильової нормалі \vec{n} $\varphi_{\vec{p}} = (\vec{U}, \vec{n})$ і інтегральний коефіцієнт пружної анізотропії \bar{A}_{μ} є найбільш загальними характеристиками анізотропії і свідчать про неоднорідну деформацію породи.
5. Квазіповздовжні хвилі розповсюджуються із знесенням енергії з кутом знесення енергії $\varphi_{\vec{E}} = (\vec{V}^{(e)}, \vec{n})$ векторів променевих $\vec{V}^{(e)}$ швидкостей пружних хвиль від напрямку хвильової нормалі \vec{n} . Також $\varphi_{\vec{E}} = (\vec{V}^{(e)}, \vec{n}) > \varphi_{\vec{p}} = (\vec{U}, \vec{n})$ - кута поляризації - відхилення векторів пружних зміщень \vec{U} від напрямку хвильової нормалі \vec{n} . Вектори пружних зміщень \vec{U} і променевих $\vec{V}^{(e)}$ швидкостей пружних хвиль відхиляються від напрямку хвильової нормалі \vec{n} на значні кути $\varphi_{\vec{E}} = (\vec{V}^{(e)}, \vec{n})$ та $\varphi_{\vec{p}} = (\vec{U}, \vec{n})$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гринченко В. Т., Улитко А. Ф., Шульга Н. А. Электроупругость. – Киев: Наукова думка, 1989. – 280 с.
2. Гринченко В. Т., Мацьпура В. Т., Снарский А. А. Введение в нелинейную динамику. – Киев: Наукова думка, 2005. – 263 с.
3. Гринченко В. Т., Вовк І. В., Мацьпура В. Т. Основы акустики. – Київ: Наукова думка, 2007. – 640 с.
4. Онанко Ю. А., Продайвода Г. Т., Вишва С. А., Онанко А. П., Куліш М. П. Автоматизована система обробки вимірювань поздовжніх та поперечних швидкостей ультразвуку // Металофізика і новітні технології – 2011. - **33**, № 13. - С. 529–533.
5. Онанко А. П., Продайвода Г. Т., Шабатура О. В., Онанко Ю. А. Реконструктивні можливості акустичної емісії при змінах напружено-деформаційного стану пісковиків Криворізької надглибокої свердловини // Вісник Київського університету. Серія: геологія. – 2011. – № 48. - С. 31–33.
6. Вишва С. А., Продайвода Г. Т., Онанко Ю. А. Сейсмоакустична діагностика процесів руйнування в геологічному середовищі // Геоінформатика. – 2011. – № 1. – С. 42-47.
7. Онанко А. П. Вплив водню на вказівну поверхню непружно-пружного тіла стопу $Ti_{0.5}Al_{0.5}$ // Металофізика і новітні технології. – 2011. – **33**, № 2. – С. 253–261.
8. Никаноров С. П., Кардашев Б. К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. – М.: Наука, 1985. – 253 с.