

Романишин Ігор¹, Мокрий Олег²

¹старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, Львів,

Україна, igor.romanyshyn1957@gmail.com

²провідний науковий співробітник, доктор технічних наук, доцент, Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, Львів, Україна,

mokomo2323@gmail.com.

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ БАГАТОЧАСТОТНОГО ЗОНДУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИМИ АКУСТИЧНИМИ ХВИЛЯМИ. ОГЛЯД

Анотація. Розглянуті закономірності впливу на дисперсійну залежність фазової швидкості хвиль Релея різних видів обробок, деградації поверхні, плівкового покриття матеріалу тощо та методи визначення властивостей приповерхневих шарів на основі дисперсійної кривої.

Ключові слова: поверхневі акустичні хвилі, дисперсійна крива, метод зваженого усереднення.

Експериментальне визначення властивостей приповерхневих шарів матеріалу є актуальною задачею фундаментального матеріалознавства і технічної діагностики матеріалів. Адекватним підходом для цього є застосування поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) різної частоти [1,2]. Це зв'язано з тим, що поверхневі акустичні хвилі проникають на глибину порядку довжини хвилі. Тому хвилі різної частоти охоплюють різні товщини приповерхневих шарів. При цьому виникає задача інверсії дисперсійної кривої фазової швидкості ПАХ (Surface Wave Inversion) [3], тобто визначення акустичних властивостей приповерхневих шарів на основі багаточастотного зондування матеріалу ПАХ. Аналогічні задачі виникають в геотехніці [4,5], сейсмології [1,6].

Розроблено ряд методів визначення властивостей матеріалу по глибині на основі зондування ПАХ [1-6]. Серед них – одномодові та багатомодові, трансмісійні на основі використання дисперсійних співвідношень, аналізу еліптичності, рефлексивні, променеві та ін. Всі ці методи, як правило, потребують розв'язку прямої задачі поширення пружних хвиль в плоскошаруватому середовищі. Для розв'язку цієї задачі застосовують чисельне інтегрування, променевий та матричний підходи. Ці методи є



складними, трудомікими, обмеженими ідеально плоскошаруватими структурами з геометричної точки зору, простими моделями середовища і поширення акустики з фізичної точки зору, не забезпечують отримання розв'язку в реальному часі і часто приводять до неоднозначного результату. Для отримання результату строгими методами змушені користуватися простими моделями, що не дозволяє застосовувати ці результати в реальних умовах. Для подолання цих труднощів користуються апріорною інформацією, евристичними підходами.

Найбільш інформативним є підхід на основі вимірювання швидкості ПАХ на різних частотах, що відповідає різним глибинам проникнення і поширення ПАХ, тобто отримання дисперсійної кривої – залежності фазової швидкості ПАХ від частоти.

В результаті зондування середовища поверхневими акустичними хвилями різної частоти і вимірювання фазової швидкості отримують експериментальну дисперсійну криву – значення фазової швидкості на різних частотах.

Неглибокі шари формують високочастотну область дисперсійної кривої, глибокі – низькочастотну.

Задача експериментального визначення структури та властивостей приповерхневих шарів на основі використання дисперсійної кривої фазової швидкості ПАХ є оберненою і зводиться до варіаційної задачі підбору параметрів середовища до тих пір, поки теоретично розрахована дисперсійна крива не буде відповідати експериментальній.

Розглянуто основні системи та технології експериментального визначення параметрів приповерхневих шарів на основі використання дисперсійної кривої фазової швидкості ПАХ. Серед них:

- лабораторна лазерно-ультразвукова система LAwave [7,8], де збудження ПАХ здійснюється імпульсним лазером, а реєстрація - ширококутовим п'єзоперетворювачем;

- лабораторна лазерно-інтерферометрична система вимірювання швидкості ПАХ, де збудження здійснюється п'єзоелектричними перетворювачами [9].

Система LAwave [7,8] знайшла широке застосування для неруйнівного контролю товщини плівок від кількох нанометрів до кількох сотень мікрометрів; твердості та товщини поверхневого зміцнення сталі від 0,8 до 1,5 мм; оцінки деградованого шару.

Розроблена високоточна лазерно-інтерферометрична система вимірювання фазової швидкості ПАХ, збуджених п'єзоперетворювачами в широкому діапазоні частот



від 1,5 МГц до 15 МГц, для неруйнівного оцінювання параметрів оброблених поверхонь методом дробоструменевої обробки, ударної обробки лазером, полірованих та ін. [9].

Розроблено ряд евристичних підходів для визначення параметрів приповерхневих шарів на основі дисперсійної залежності фазової швидкості Релея [10-12]. Серед них найбільш поширеним є метод зваженого усереднення на довжині зондуючої акустичної хвилі.

Аналіз чутливості дисперсійної кривої ПАХ до густини, швидкостей поздовжньої і поперечної хвилі, товщини шарів показав, що швидкість поперечної хвилі і товщина домінуюче впливають на фазову швидкість релеївської хвилі. Тому товщина шару і швидкість поперечної хвилі в першу чергу коригуються для мінімізації невідповідності між теоретичними та експериментальними дисперсійними кривими. Варіації інших параметрів призводять до невеликої похибки дисперсійних кривих [11, 12].

Для методу зваженого усереднення [11, 12]: фазова швидкість хвилі Релея на певній довжині хвилі $V_R(\lambda)$ на дисперсійній кривій для багатошарового середовища залежить від швидкостей поперечних хвиль шарів у межах глибини довжини хвилі, а внесок фазових швидкостей хвилі Релея кожного окремого шару V_i зважується ваговим коефіцієнтом W_i , який залежить від товщини шару H_i для N шарів в межах однієї довжини хвилі.

Таким чином, фазова швидкість Релея на довжині хвилі є лінійною комбінацією швидкостей в шарах в межах довжини хвилі:

$$V(\lambda) = \sum_{i=1}^N W_i V_i \quad 0 \leq W_i \leq 1 \quad \sum_{i=1}^N W_i = 1$$

Вагові коефіцієнти розраховуються за формулою:

$$W_i = \frac{\int_{z_{i-1}}^{z_i} f\left(\frac{z}{\lambda}\right) dz}{\int_0^L f\left(\frac{z}{\lambda}\right) dz} \quad f\left(\frac{z}{\lambda}\right) = 1 - \left(\frac{z}{\lambda}\right)^{3/2} \text{ - ядро зважування.}$$

Цей вираз подібний до зміщення вертикальної складової хвилі Релея.

Отримано аналітичний вираз для дисперсійної кривої у випадку спрощеного варіанту методу зваженого усереднення, який свідчить, що дисперсійна крива фазової швидкості хвилі Релея для одношарового покриття обробленої поверхні є прямою лінією, що добре узгоджується з відомими розглянутими закономірностями впливу різних видів обробки, деградації поверхні та покриття на дисперсію фазової швидкості Релея. По знаку нахилу дисперсійної кривої (плюс/мінус) можна судити про жорсткість



покриття по відношенню до жорсткості підложки. По величині кутового нахилу дисперсійної кривої можна оцінювати товщину обробленої поверхні.

Висновки. Розглянуті закономірності впливу на дисперсійну залежність фазової швидкості ПАХ різних видів обробок, деградації поверхні, плівкового покриття. Дисперсійна залежність фазової швидкості хвиль Релея є однією з найбільш інформативних для визначення властивостей приповерхневих шарів.

Розглянуті методи визначення властивостей приповерхневих шарів на основі дисперсійної кривої фазової швидкості хвилі Релея. Одним з найефективніших методів визначення властивостей приповерхневих шарів в режимі реального часу є метод зваженого усереднення фазової швидкості хвилі Релея по товщині, що дорівнює довжині хвилі, з врахуванням шарів в межах довжини хвилі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aki K., Richards P.G. Quantitative Seismology. 2nd Edition. – CA: Univ. Sci. Books, Sausalito, 2002. – 700 p.
2. Hess P. Surface Acoustic Waves in Materials Science // *Physics Today*. – 2002. – **55**, 3. – P. 42-47.
3. Maupin V. Surface Wave Inversion // *Encyclopedia of Earthquake Engineering*. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. – 16p.
4. Socco L., Foti S., Boiero D. Surface-wave analysis for building near-surface velocity models — Established approaches and new perspectives // *Geophysics*. – 2010, **75**. – 5. – P.75A83-75A102.
5. Ahn E. Surface-Wave Based Technique for the Evaluation of Self-Healing Performance in Concrete. – M.Sc. Thesis / Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology. – 2017. – 79 p.
6. Foti S., Parolai S., Albarello D., Picozzi M. Application of Surface-Wave Methods for Seismic Site Characterization // *Surveys in Geophysics*. – 2011. – **32**, 6. – P. 777-825.
7. Schneider D. LAwave® – A Nondestructive Device for Testing Thin Films, Coatings and Material Surfaces by Laser Induced Surface Acoustic Waves / Technical Report. – Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS. – 2013, January. – 9 p. DOI: 10.13140/2.1.4564.7047.
8. Schneider D. Laser Induced Surface Acoustic Waves for Material Testing. Chapter 6. In book: Ida N., Meyendorf N. (eds) *Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation*. – 2019. July. – P. 171-234. DOI: [10.1007/978-3-319-26553-7_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26553-7_38).



9. Ruiz A. M., Nagy P. B. SAW dispersion measurements for ultrasonic characterization of surfacetreated metals // Instrumentation Measure Metrologie. – 2003. – X. – X. – 26 p.
10. Satoh T., Poran C.I., Yamagata K., Rondriquez J.A. Soil profiling by spectral analysis of surface waves. In: Proceedings of the second international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics, vol. II. - 1991. - P.1429–1434.
11. Leong E.C., Aung A.M.W. Weighted Average Velocity Forward Modelling of Rayleigh Surface Waves // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2012, 43. – P.218–228.
12. Leong E.C., Aung A.M.W. Global Inversion of Surface Wave Dispersion Curves Based on Improved Weighted Average Velocity Method // J. Geotech. Geoenviron. Eng. – 2013, 139, December. – P. 2156-2169.

