

Дослідження частотних і амплітудно-частотних характеристик промислових ультразвукових перетворювачів для неруйнівного контролю якості матеріалів

Я.О. Сєріков, Л.А. Назаренко

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна
s0509088828@gmail.com

Анотація

Ультразвуковий імпульсний метод є одним з ефективних методів неруйнівного контролю якості матеріалів. Він застосовується для дослідження широкого класу матеріалів — пластмас, клейових з'єднань, будівельних матеріалів, а також обстеження будівель і споруд. Використання цього методу дає змогу визначити фізико-механічні характеристики, порушення структури матеріалів, наявність сторонніх включень. При використанні цього методу для дослідження матеріалів пористої структури, а також при вимірюванні характеристик ультразвукового сигналу на значних відстанях між випромінюючим і прийомним ультразвуковими перетворювачами спостерігається значне загасання амплітуди інформаційного сигналу. В цьому разі його амплітуда часто знаходиться на рівні шумів. Це може викликати зниження точності, достовірності результатів. Одним із напрямків забезпечення необхідних рівнів точності, достовірності даних вимірювання в цьому разі є використання частотних характеристик приймально-передавального тракту контрольно-вимірювальних пристроїв. Одним з елементів цього тракту є ультразвукові перетворювачі. Наведено дослідження частотних і амплітудно-частотних промислових ультразвукових перетворювачів, виготовлених із цирконату-титанату свинцю з зазначеними номінальними частотами 60, 100 і 150 кГц. На основі аналізу результатів дослідження зроблено висновки і розроблено рекомендації, спрямовані на вирішення задачі підвищення точності, надійності й достовірності результатів вимірювання. В кінцевому рахунку вирішення такої задачі забезпечить підвищення точності контролю якісних характеристик досліджуваних матеріалів — їх структури, фізико-механічних характеристик. Дані дослідження можуть бути використані для вдосконалення контрольно-вимірювальної апаратури, що реалізує цей метод неруйнівного контролю.

Ключові слова: контроль якості матеріалів, ультразвуковий імпульсний метод, ультразвукові перетворювачі, амплітудно-частотна характеристика.

Отримано: 14.08.2018

Відредаговано: 30.08.2018

Схвалено до друку: 07.09.2018

Вступ

Ультразвуковий імпульсний метод широко застосовують для контролю якості матеріалів різних типів і структур, у тому числі й композиційних, як в Україні, так і за кордоном. Цей метод дозволяє досліджувати фізико-механічні характеристики матеріалів, наявність структурних порушень, сторонніх (чужорідних) включень, мікротріщин тощо з достатньою точністю і вірогідністю результатів. Як непрямі вимірювальні параметри якісних характеристик досліджуваних матеріалів використовують час поширення ультразвукових коливань від випромінюючого до приймального перетворювача, відносну зміну амплітуди інформаційного сигналу на різних ділянках матеріалу, його спектральні характеристики тощо [1, 2].

Постановка проблеми

Точність, достовірність даних вимірювання, чутливість і в результаті — ефективність ультразвукового імпульсного методу в цілому, особливо при контролі композиційних матеріалів, визначається не тільки технічними характеристиками вимірювальної апаратури, рівнем структурних неоднорідностей досліджуваного матеріалу, але й якістю ультразвукових перетворювачів (УП) [1, 3].

Підвищення точності й достовірності даних контролю забезпечується локалізацією напрямку випромінювання зондувального імпульсу, підвищенням відношення “сигнал — шум” у блоках попереднього підсилення інформаційного сигналу, а також спеціалізованими схемотехнічними засобами.

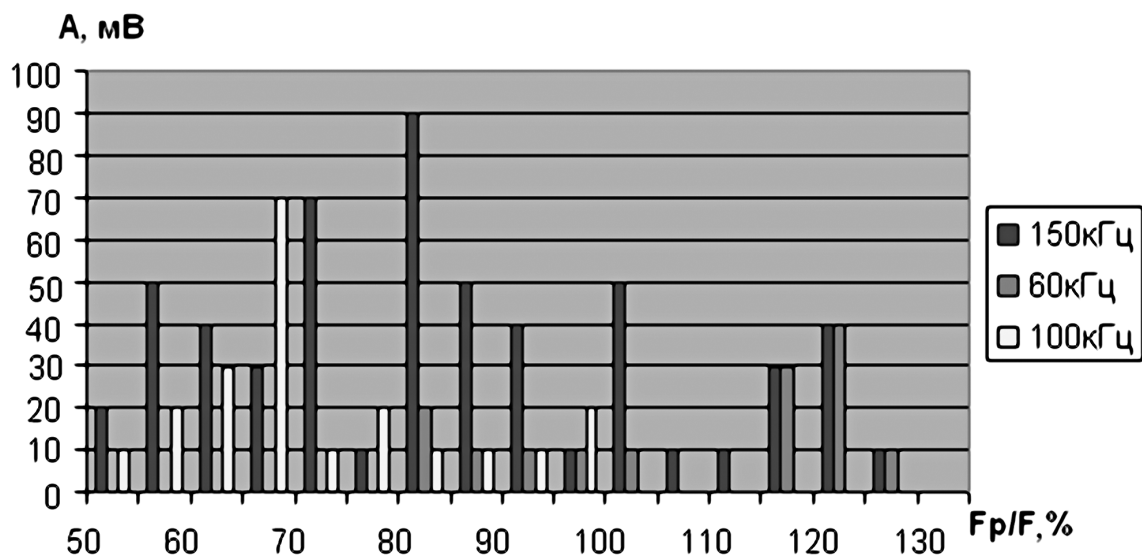


Рис. 1. Гістограма розподілу відхилення власної частоти ультразвукового перетворювача (F_p) від номінального значення (F_n)

Але при дослідженні структури, фізико-механічних характеристик матеріалів із порушеною структурою, таких, що мають високий акустичний опір, характеризуються підвищеною тріщинуватістю, при вимірюваннях на значних відстанях між випромінюючим і приймальним перетворювачами виникає необхідність подальшого підвищення чутливості контрольно-вимірювальних пристроїв [4–9]. У цьому разі стає гострою необхідністю використання всього потенціалу приймально-передавального тракту, в тому числі й ультразвукових перетворювачів, тому що рівень інформаційного сигналу найчастіше виявляється на рівні перешкод [5]. До того ж при роботі з сигналами, амплітуда яких порівняна з рівнем шумів, УП мають мінімальну похибку відтворення сигналів при деякому оптимальному значенні свого частотного діапазону [10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним із реальних напрямків вирішення цієї задачі є використання резонансних характеристик ультразвукових перетворювачів. У цьому разі оцінка динаміки процесів, що відбуваються в УП, може бути зроблена на основі математичної моделі, що описує його стан у будь-який момент часу. Проте наразі, у зв'язку з відсутністю повної теорії роботи УП в імпульсному режимі, при побудові такої моделі виникають труднощі. Результати дослідження УП в цьому напрямку, що опубліковані в окремих літературних джерелах, не можуть бути поширені на різні типи застосовуваних ультразвукових перетворювачів.

Наразі розроблено низку методик для вимірювання загальних характеристик УП [1, 2]. До них віднесено коефіцієнт перетворення (частота максимуму коефіцієнта перетворення і смуга частот), ширину діаграми спрямованості, кут між напрямком максимального випромінювання і нормаллю до випромінюючої поверхні, дозволяючи здатність по фронту й глибині

зондувального сигналу, а також ревербераційно-шумову характеристику і електричний вхідний імпеданс. Проте детальний облік цих факторів, їх вибір і обґрунтування неможливі без аналізу параметрів самих УП. Сьогодні це питання залишається актуальним.

Виклад основного матеріалу

Виходячи з постановки завдання, співвідносячись із наявними можливостями, було проведено статистичний аналіз резонансних частот і амплітудно-частотних характеристик ультразвукових перетворювачів, що застосовують у практиці неруйнівного ультразвукового контролю якості матеріалів. При дослідженнях були використані промислові УП, виготовлені з цирконату-титанату свинцю (ЦТС) із зазначеними номінальними резонансними частотами 60, 100 і 150 кГц.

Експеримент полягав у вимірюванні частоти відгуку (F_p) УП (фактично резонансної частоти) при збудженні їх прямокутними імпульсами амплітудою 100 В. На рис. 1 у графічному вигляді наведено результати досліджень розподілу відхилення власної (резонансної) частоти УП (F_p) від номінального значення (F_n), зазначеного на його корпусі. Результати подано гістограмами для УП трьох номінальних значень F_n : 60, 100 і 150 кГц.

Отримані дані вказують на істотну різнохарактерність залежності F_p і не підлягають опису жодним із відомих законів розподілу. Але результати досліджень показують, що закономірним є зміщення характеру розподілу власної частоти у бік більш низьких частот діапазону для УП з $F_n = 100, 150$ кГц і в бік більш високих частот — для УП з $F_n = 60$ кГц.

На рис. 2 подано результати досліджень амплітудно-частотних характеристик УП. На графіках кожна точка представляє усереднений результат 10 вимірювань. Найбільша середньоквадратична по-

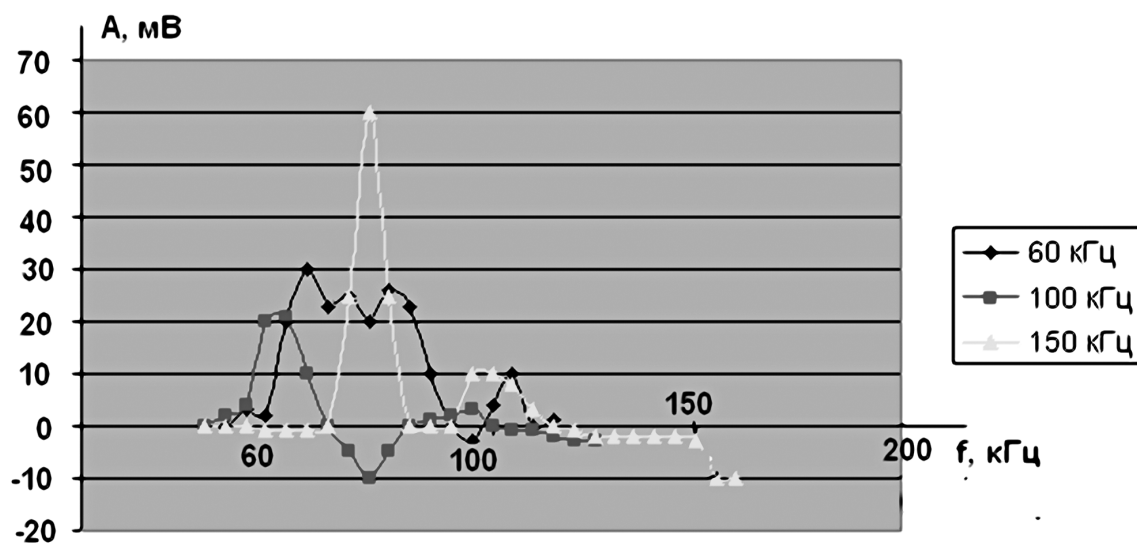


Рис. 2. Амплітудно-частотні характеристики ультразвукових перетворювачів промислового виготовлення номінальною частотою 60 кГц, 100 кГц, 150 кГц

хибка результату вимірювання не перевищувала $\delta = 5-6\%$. Дані досліджень показують, що амплітудно-частотні характеристики УП відрізняються іррегулярністю, виявляючи кілька максимумів різної амплітуди. Внаслідок цього можна зробити висновок про значну нерівномірність чутливості УП у визначеному частотному діапазоні. Цей факт є особливо важливим і повинен враховуватися при побудові приймально-підсилювального тракту контрольно-вимірювальних приладів, що реалізують ультразвуковий метод неруйнівного контролю якості матеріалів.

Висновки

Врахування виявлених у результаті проведених досліджень закономірностей у відхиленнях власної частоти промислових ультразвукових перетворювачів дасть змогу забезпечити підвищення достовірності й точності даних вимірювання при контролі якості композитних матеріалів, у тому числі при значних відстанях між випромінюючим і приймальним УП.

Виявлена нерівномірність амплітудно-частотних характеристик промислових ультразвукових перетворювачів може викликати появу додаткової похибки результатів вимірювання через нерівномірність їхньої чутливості у визначеному частотному діапазоні. Виходячи з цього, з метою підвищення точності вимірювань при імпульсному методі контролю необхідно забезпечувати вибір оптимальної тривалості зондувального сигналу для відносного вирівнювання частотних характеристик ультразвукових перетворювачів.

Для зменшення систематичної похибки вимірювань необхідне попереднє калібрування кожної пари застосовуваних ультразвукових перетворювачів за амплітудно-частотними характеристиками, а результати калібрування слід використовувати в процесі побудови приймально-передавального тракту контрольно-вимірювальних приладів для неруйнівного ультразвукового контролю якості матеріалів.

У кінцевому результаті вирішення зазначеної задачі забезпечить підвищення точності контролю якісних характеристик досліджуваних матеріалів — їх структури, фізико-механічних характеристик.

Исследование частотных и амплитудно-частотных характеристик промышленных ультразвуковых преобразователей для неразрушающего контроля качества материалов

Я.А. Сериков, Л.А. Назаренко

Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харьков, Украина
s0509088828@gmail.com

Анотация

Ультразвуковой импульсный метод является одним из эффективных методов неразрушающего контроля качества материалов. Он применяется для исследования широкого класса материалов, а также обследования

зданий и сооружений. Его использование позволяет определять физико-механические характеристики, нарушение структуры материалов, наличие посторонних включений. При использовании этого метода для исследования материалов пористой структуры, а также при измерении характеристик ультразвукового сигнала на значительных расстояниях между излучающим и приемным ультразвуковыми преобразователями наблюдается значительное затухание амплитуды информационного сигнала. В этом случае его амплитуда часто находится на уровне шумов. Это может вызвать снижение точности, достоверности результатов. Одним из направлений обеспечения необходимых уровней точности, достоверности данных измерения в этом случае является использование частотных характеристик приемно-передающего тракта контрольно-измерительных устройств. Одним из элементов этого тракта являются ультразвуковые преобразователи. Приведены исследования частотных и амплитудно-частотных промышленных ультразвуковых преобразователей, изготовленных из цирконата-титаната свинца с указанными номинальными частотами 60, 100 и 150 кГц. На основе анализа результатов исследования сделаны выводы и разработаны рекомендации, направленные на решение задачи повышения точности, надежности и достоверности результатов измерения. В конечном счете, решение такой задачи обеспечит повышение точности контроля качественных характеристик исследуемых материалов – их структуры, физико-механических характеристик. Данные исследования могут быть использованы для совершенствования контрольно-измерительной аппаратуры, реализующей этот метод неразрушающего контроля.

Ключевые слова: контроль качества материалов, ультразвуковой импульсный метод, ультразвуковые преобразователи, амплитудно-частотная характеристика.

Research of frequency and amplitude-frequency characteristics of industrial ultrasound transducers for non-destructive quality control of materials

Ya.O. Serikov, L.A. Nazarenko

*O.M. Beketov National University of Urban Economics in Kharkiv, St. Marshala Bazhanova, 17, 61002, Kharkiv, Ukraine
s0509088828@gmail.com*

Abstract

Ultrasonic pulse method is one of the effective methods of nondestructive quality control of materials. It is used to study a wide range of materials, when inspecting buildings and structures. Its use makes it possible to determine the physical and mechanical characteristics, the structure of materials, the presence of foreign inclusions. When this method is used to study the materials of the porous structure, and also when measuring the characteristics of the ultrasonic signal at considerable distances between the radiating and receiving ultrasonic transducers, a significant attenuation of the amplitude of the information signal is observed. In this case, its amplitude is often at the noise level. This can cause a decrease in the accuracy of the results. One of the directions of providing the necessary levels of accuracy, reliability of the measurement data is the use of the frequency characteristics of the receiving and transmitting path of the monitoring and measuring devices. One of the elements of this path is ultrasonic transducers. The article presents research of frequency and amplitude-frequency industrial ultrasonic transducers made of lead zirconate titanate with specified nominal frequencies of 60, 100 and 150 kHz. Based on the analysis of the research results, conclusions were drawn and recommendations developed aimed at solving the problem of increasing the accuracy, reliability and validity of the measurement results. The solution of this problem will ensure an increase in the accuracy of the control of the quality characteristics of the materials under study – their structure, physical and mechanical characteristics. This research can be used to improve the control and measuring equipment by which this method of non-destructive control is realized.

Keywords: material quality control, ultrasonic pulse method, ultrasonic transducers, amplitude-frequency characteristic.

Список літератури

1. Шутенко Л. М., Серіков Я. О., Золотов М. С. та ін. Дослідження будівельних матеріалів, конструкційних елементів будинків і споруд та механічних систем неруйнівними методами на основі пружних хвиль: монографія. Харків: ІОЦ ХНАМГ, 2009. 260 с.
2. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. Пер. с англ. под ред. И. Михайлова, В. Леманова. Москва: Мир, 1972. 308 с.
3. Сериков Я. А., Беляев Н. Р. Математическое моделирование импульсного информационного сигнала упругих волн в решении задачи повышения надежности оценки физико-механических свойств материалов и изделий. *Охрана труда и экология в строительстве*: сб. науч. трудов науч.-техн. конф. Днепропетровск: ПГАСиА, 2001. С. 26–29.
4. Serikov J. Research of technological properties of polymeric materials by the ultrasonic pulse method. 5th World Congress on Ultrasonic WCU 2003. Paris, France, pp. 87–88.
5. Сериков Я. А. Решение задачи контроля структуры бетона искусственной кровли шахтных и подземных сооружений на базе активного акустического метода. *Строительство и эксплуатация угольных шахт и городских подземных сооружений*: материалы VI Российско-Китайского симпозиума. Кемерово, Россия: КузГТУ, 2010. С. 342–346.
6. Серіков Я. О. Застосування пружних хвиль для контролю структури бетонних закладочних масивів. *Строительство, материаловедение, машиностроение*: сб. науч. трудов. Вып. 24. Днепропетровск: ПГАСиА, 2003. С. 161–166.
7. Сериков Я. А. Исследование процесса трещинообразования в клеевых соединениях бетона при переменной внешней нагрузке ультразвуковым импульсным методом. *Актуальные проблемы развития жилищно-коммунального хозяйства городов и населенных пунктов*: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. София (Болгария), Кавала (Греция), 2010. С. 361–367.
8. Серіков Я. О. Інформаційні технології у вирішенні завдань визначення стану експлуатованих будинків і споруд. *Качество технологий — качество жизни*: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. Солнечный Берег, Болгария, 2012. С. 19–21.
9. Серіков Я. О. Розробка системи прогнозування й забезпечення безпечної експлуатації бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд на основі моделювання і ультразвукового імпульсного методу контролю. *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід*: матеріали Міжнар. конф. Відень, Австрія, 2017. С. 307–312.
10. Неразрушающий контроль. Кн. 2. Акустические методы контроля: В. В. Сухоруков (ред.). Москва: Высшая школа, 1991. 283 с.

References

1. Shutenko L. M., Serikov Ya. O., Zolotov M. S. et al. *Doslidzhennya budivelnykh materialiv, konstruktivnykh elementiv budynkiv i sporud ta mekhanichnykh system neruynivnymy metodamy na osnovi pruzhnykh khvyl* [Research of building materials, structural elements of buildings and structures and mechanical systems by non-destructive methods on the basis of elastic waves]. Kharkiv, IOC KSAME, 2009. 260 p. (in Ukrainian).
2. Truell R., Elbaum C., Chick B. Ultrasonic methods in solid state physics. New York and London, Acad. Press, 1969. 464 p. (Russ. ed. I. Mykhailov, V. Lemanov. *Ul'trazvukovyye metody v fizike tverdogo tela*). Moscow, Mir Publ., 1972. 308 p.
3. Serikov Ya. A., Belyayev N. R. Matematicheskoye modelirovaniye impul'snogo informatsionnogo signala uprugikh voln v reshenii zadachi povysheniya nadezhnosti otsenki fiziko-mekhanicheskikh svoystv materialov i izdeliy [Mathematical modeling of the impulse information signal of elastic waves in solving the problem of increasing the reliability of the evaluation of physical and mechanical properties of materials and products]. *Labor protection and ecology in construction*: Collection of scientific works of Scientific and Technical Conference. Dnepropetrovsk, PGAASiA, 2001, pp. 26–29 (in Russian).
4. Serikov J. Research of technological properties of polymeric materials by the ultrasonic pulse method. 5th World Congress on Ultrasonic WCU 2003. Paris, France, pp. 87–88.
5. Serikov Ya. A. Resheniye zadachi kontrolya struktury betona iskusstvennoy krovli shakhtnykh i podzemnykh sooruzheniy na baze aktivnogo akusticheskogo metoda [Solution of the problem of control of the structure of concrete of the artificial roof of mine and underground structures on the basis of the active acoustic method]. *Construction and Exploitation of Coal Mines and Urban Underground Structures*: Proceedings of VI Russian-Chinese Symposium. Kemerovo, Russia, KuzGTU, 2010, pp. 342–346 (in Russian).
6. Syerikov Ya. O. Zastosuvannya pruzhnykh khvyl dlya kontrolyu struktury betonnykh zakladochnykh masyviv [Application of elastic waves for controlling the structure of concrete bedding arrays]. *Construction, materials science, machine building*: Collection of scientific works. Issue 24. Dnepropetrovsk, PGASiA, 2003, pp. 161–166 (in Ukrainian).
7. Serikov Ya. A. Issledovaniye protsessa treshchينوobrazovaniya v kleyevykh soyedineniyakh betona

- pri peremennoy vneshey nagruzke ul'trazvukovym impul'snym metodom [Investigation of the process of crack formation in adhesive joints of concrete with a variable external load by ultrasonic pulse method]. *Actual problems of development of housing and communal services of cities and settlements*: Proceedings of IX International Scientific and Practical Conference. Sofia (Bulgaria), Kavala (Greece), 2010, pp. 361–367 (in Russian).
8. Syerikov Ya.O. Ynformatsiyni tekhnolohiyi u vyrishenni zavdan vyznachennya stanu ekspluatovanykh budynkiv i sporud [Information technologies in solving the problems of determining the state of the exploited houses and buildings]. *Quality of technology – quality of life*: Proceedings of V International Scientific and Practical Conference. Sunny Beach, Bulgaria, 2012, pp. 19–21 (in Ukrainian).
 9. Syerikov Ya.O. Rozrobka systemy prohnozuvannya y zabezpechennya bezpechnoyi ekspluatatsiyi betonnykh i zalizobetonnykh konstruksiy i sporud na osnovi modelyuvannya i ultrazvukovoho impulsnoho metodu kontrolyu [Development of the system of prediction and maintenance of safe operation of concrete and reinforced concrete constructions and structures on the basis of modeling and ultrasonic pulsed control method]. *Innovative technologies in science and education. European Experience*: Proceedings of International Conference. Vienna, Austria, 2017, pp. 307–312 (in Ukrainian).
 10. Sukhorukov V.V. (ed.). *Nerazrushayushchiy kontrol'*. Kn. 2. *Akusticheskiye metody kontrolya* [Non-destructive testing. Book 2. Acoustic methods of control]. Moscow, Vysshaya shkola, 1991. 283 p. (in Russian).