

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ У МЕТАЛІ ПРИ ЗМІНІ ВЕЛИЧИНИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ

І.З. Лютак, І.С. Кісіль, З.П. Лютак, А.А. Мандра

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46077,
e-mail: public@nuing.edu.ua

Розроблено підхід для моделювання скінченними елементами поширення ультразвукових коливань у металевій пластині. Досліджено параметри поширення ультразвукової поверхневої хвилі в металевій пластині при змінених фізико-механічних властивостях поверхневого шару та виявлено зміни швидкості її поширення. Представлено графічні залежності основних результатів розрахунків.

Ключові слова: корозія, поверхнева ультразвукова хвиля, метод скінченних елементів

Разработан подход к моделированию конечными элементами распространения ультразвуковых колебаний в металлической пластине. Исследованы параметры распространения ультразвуковой поверхностной волны в металлической пластине при измененных физико-механических свойствах поверхностного слоя и выявлены изменения скорости ее распространения. Представлены графические зависимости основных результатов расчетов.

Ключевые слова: коррозия, поверхностная ультразвуковая волна, метод конечных элементов

The approach for finite element modeling of the ultrasonic waves propagation in a metal plate is developed. Investigated the ultrasound parameters of surface waves propagation in the metal plate at the changed physical and mechanical properties of the surface layer and found the velocity change. Main results are presented in graphs.

Keywords: corrosion, surface ultrasonic wave, finite element method

Вступ

Дослідження механічних властивостей поверхні металевих конструкцій є важливим завданням, мета якого – виявити ранні стадії їх корозії та запобігти передчасному зношуванню.

Дослідження механічних властивостей поверхні металевих конструкцій найбільш доцільно проводити ультразвуковим методом з використанням хвиль Релея, оскільки вони поширюються вздовж границі розділу середовищ. Коливання елементарного об'єму пружного середовища, що створюються хвилями Релея, визначаються законами механіки та його механічними властивостями, що дає змогу визначати зміни окремих параметрів поверхні металоконструкцій без використання опосередкованих підходів, у яких відсутня пряма математична залежність між вимірюваною та досліджуваною величинами.

Дослідженнями властивостей хвиль Релея в неруйнівному контролі займалися ряд науковців. Серед них можна виокремити працю групи науковців на чолі з Р. Едварсом, де досліджується визначення розміру дефектів за аналізом параметрів хвиль Релея, збуджених та прийнятих електроакустичним перетворювачем [1]. Цими науковцями встановлено, що важливим етапом контролю хвилями Релея є калібрування пристроїв реєстрації ультразвукових сигналів. З цією метою було виготовлено зразки із тестовими дефектами. Недоліком такого підходу є складність застосування розробленої системи на реальних об'єктах із невідомими параметрами середовища поширення хвиль Релея. Науковець Ксіан-Фанг Лі розглянув апроксимовані

методи обчислення швидкості поширення хвиль Релея з метою спростити алгоритм обчислення у порівнянні із аналітичним рівнянням [2]. Недоліком такого підходу є складність обчислення багатошарового об'єкту. Аналітичні співвідношення для обчислення швидкості хвиль Релея наведені науковцем Дж. Роузом [3]. Однак в своїй праці він не навів поширення хвиль Релея у багатошаровому середовищі.

Метою даної роботи є розробити підхід обчислення параметрів поширення хвиль Релея в металевій пластині із поверхневим шаром, що відрізняється за своїми фізико-механічними властивостями від решти частини пластини.

Математичний опис поширення поверхневих ультразвукових хвиль

Поширення поверхневих ультразвукових хвиль будемо розглядати для випадку однієї границі розділу середовища (рис. 1) [3]. При цьому елементарний об'єм середовища коливається по еліпсу, оскільки поверхнева хвиля формується із суперпозиції поперечної та поздовжньої хвиль [3]:

$$\begin{aligned} u &= (re^{-qy} - 2sqe^{-sy}) \cos k_R(x - c_R t), \\ w &= q(re^{-qy} - 2e^{-sy}) \sin k_R(x - c_R t), \\ s &= \sqrt{1 - \eta^2 \zeta^2}, \quad q = \sqrt{1 - \eta^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{c_T}{c_L} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}}, \quad \eta = \frac{c_R}{c_T}, \quad r = 2 - \eta^2,$$

де: u, w – вектори зміщення елементарного об'єму пружного середовища вздовж корди-

натних осей oX та oY ; t – час; k_R – хвильове число поверхневої хвилі, c_L, c_T, c_R – відповідно швидкості поширення поздовжньої, поперечної та поверхневої ультразвукових хвиль; ν – коефіцієнт Пуассона.

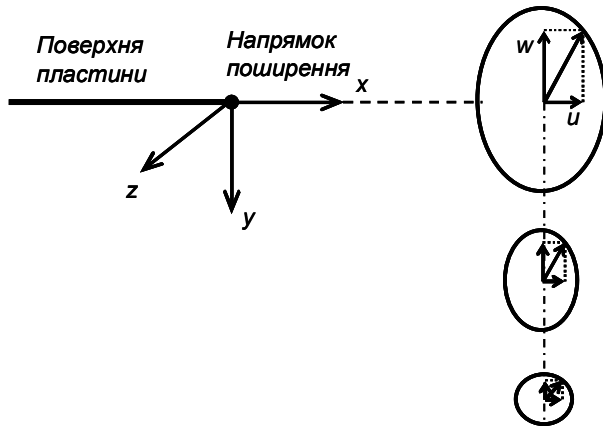


Рисунок 1 – Вектор зміщення елементарного об'єму пружного середовища при поширенні хвилі Релея

Швидкість поширення поверхневих ультразвукових хвиль можна знайти з такого рівняння [0]:

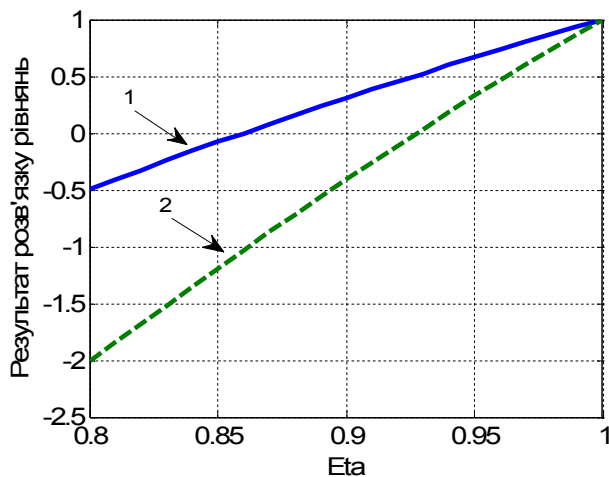
$$\eta^6 - 8\eta^4 + 8\eta^2(3 - 2\zeta^2) + 16(\zeta^2 - 1) = 0. \quad (2)$$

Розв'язок рівняння (2) має декілька коренів – два комплексні і один дійсний за умови $\nu > 0,263$, а при $\nu \leq 0,263$ – три дійсні корені, але один з них є реалістичним [3].

Для обчислення швидкості поверхневих хвиль застосовується й інше рівняння [2]:

$$\eta^3 - 8\eta^2 + \eta(24 - 16\zeta^2) - 16(1 - \zeta^2) = 0. \quad (3)$$

Різниця між формулами (2) та (3) представлені на рис. 2.



1 – рівняння (3), 2 – рівняння (2)

Рисунок 2 – Результат розв'язку аналітичних рівнянь швидкості поширення поверхневих ультразвукових хвиль

Як можна побачити із рис. 2, кожне із рівнянь по-різному визначає швидкість поширення поверхневої ультразвукової хвилі. Для приведення визначення швидкості поверхневих

хвиль до більш зручного способу, згадаємо апроксимаційне рівняння Вікторова [3]:

$$\eta = (0,87 + 1,12\nu)/(1 + \nu). \quad (4)$$

Існують і інші рівняння апроксимації швидкості поширення поверхневих хвиль:

за Л. Бреховських [4]

$$\eta = 1 - \frac{\alpha}{2} - \frac{5\alpha^2}{8} + \frac{27\alpha^3}{16}, \quad \alpha = \frac{1 - \nu}{4(1 + \nu)}; \quad (5)$$

за А. Брігсом [5]

$$\eta = 1 / (1,14418 - 0,25771\nu + 0,12661\nu^2); \quad (6)$$

за Ксіан-Фанг Лі [2]

$$\eta = \left\{ (27,425 - 11,425 - \sqrt{187,4384\nu^2 - 52,4769\nu + 121,0384}) \times (21,5(1 - \nu))^{-1} \right\}^{1/2}.$$

Графічні залежності для рівнянь (4)–(5) представлені на рис. 3. Як бачимо, апроксимація швидкості поширення ультразвукових поверхневих хвиль рівнянням (6) значно відрізняється від інших. Результати апроксимації рівняннями (5) та (7) є доволі подібними.

Загасання амплітуди зміщення елементарного об'єму пружного середовища по товщині пластини розраховано за рівняннями, згаданими в праці [6] (рис. 4).

Як можна побачити (рис. 4), на частоті 1 МГц поверхнева ультразвукова хвиля суттєво проникає (на 20 %) у товщину пластини.

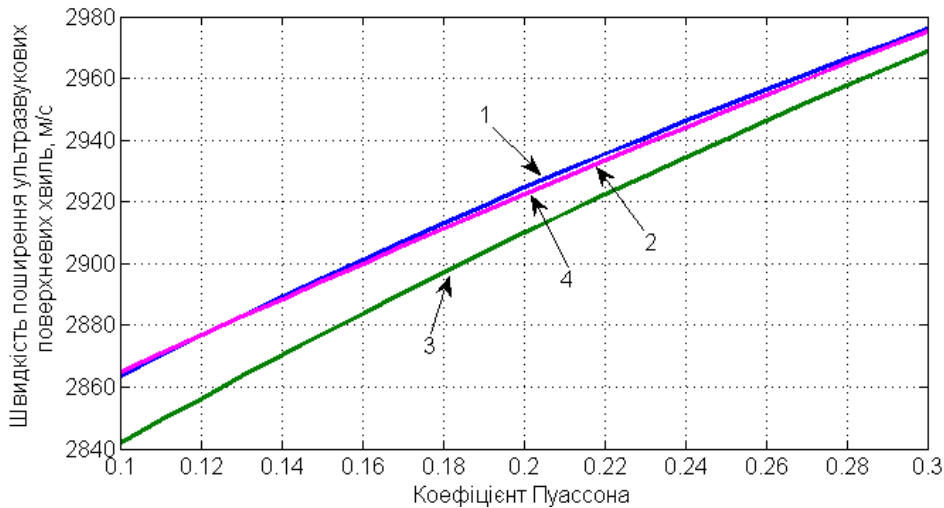
Отже, аналіз поширення поверхневих ультразвукових хвиль є складною задачею. Ця задача ускладнюється ще більше, коли потрібно проводити аналіз пластини за кількома шарами із різними фізико-механічними властивостями. Для спрощення цієї задачі скористаємося методом скінченних елементів.

Числова модель поширення поверхневих ультразвукових хвиль

Розв'язок моделі поширення поверхневих ультразвукових хвиль зводиться до пошуку апроксимованих скінченними елементами розв'язків для переміщень, деформацій, напружень та зусиль, що визначаються деяким набором зусиль отриманими впродовж дослідження. Для точного розв'язку такої моделі необхідно знайти баланс сил протягом всього часу дослідження. Метод скінченних елементів базується на підході пошуку такого балансу сил для скінченних частин об'єкту, що дає змогу "дискретизувати" сформовану задачу. Точне рівняння балансу сил реалізоване методом скінченних елементів має вигляд [7]:

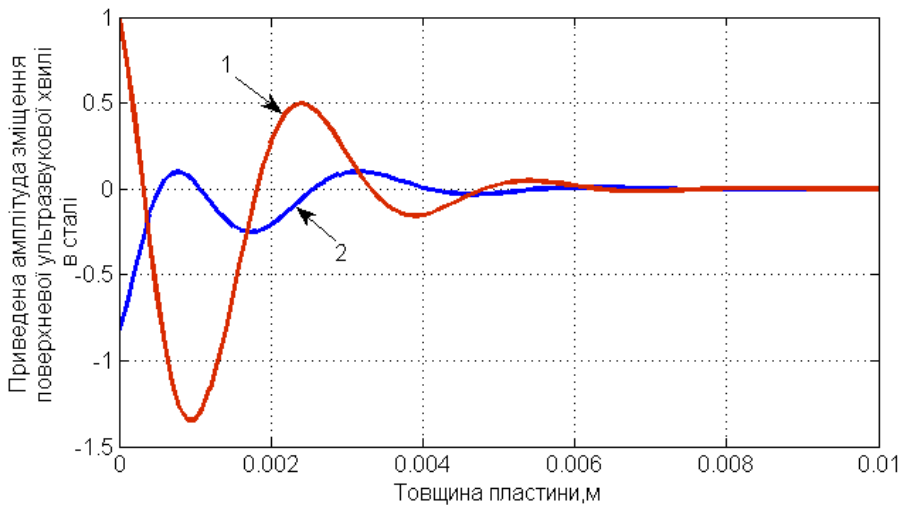
$$\int_V \sigma / \delta D dV = \int_S \delta V F \cdot T dS + \int_V \delta V F \cdot F \cdot dV, \quad (8)$$

де: δFV – віртуальна функція швидкості, що сумісна із всіма кінематичними граничними умовами та є неперервною на досліджуваному об'єкті та інтервалі часу; V – об'єм досліджуваного об'єкту, δD – величина зміни деформацій;



1 – рівняння (4), 2 – рівняння (5), 3 – рівняння (6), 4 – рівняння (7)

Рисунок 3 – Результати розв'язку апроксимаційних рівнянь швидкості поширення поверхневих ультразвукових хвиль



1 – поляризація вздовж осі OX , 2 – поляризація вздовж осі OY

Рисунок 4 – Зміщення по товщині сталевій пластині елементарного об'єму пружного середовища від поширення ультразвукової поверхневої хвилі на частоті 1 МГц

σ – матриця напружень Коші; S – площа поверхні; T – сила на одиницю площі; F – сила на одиницю об'єму.

Для виконання рівняння (8) необхідно задовольнити такі додаткові умови [7]:

$$T = n\sigma, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial x} + F = 0, \quad \sigma = \sigma^T, \quad (9)$$

$$\delta D = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \delta V F}{\partial x} + \left(\frac{\partial \delta V F}{\partial x} \right)^T \right),$$

де: x – вектори-орти Декартової системи координат, n – нормаль до поверхні.

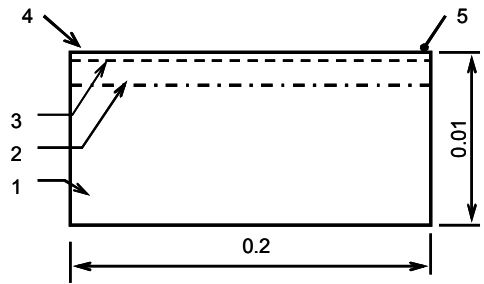
Фізична інтерпретація (8) є такою: величина роботи, виконана зовнішніми силами, викликаними деяким полем віртуальної швидкості, дорівнює величині роботи, виконаної зрівно-зважувальними напруженнями на величину деформацій цього ж поля віртуальної швидкості [7]. Поширення поля віртуальної швидкості

є обмеженим кількістю вузлів сітки скінченних елементів. Як поле віртуальної швидкості може виступати довільна шукана функція, що задовольняє відповідним умовам.

У випадку поширення ультразвукової хвилі у сталевій пластині розраховують величини прискорень та напружень у вузлах та об'ємі скінченних елементів. Моделювання поширення ультразвукової хвилі в пластині проводилось у два етапи (рис. 5). На першому етапі товщина поверхні пластини із зміненими фізико-механічними параметрами дорівнювала 1,0 мм, а на другому – 0,2 мм. Механічні параметри сталі є такими: густина – 7850 кг/м³, модуль Юнга – 2,1·10¹¹ Па, коефіцієнт Пуассона – 0,3. Механічні параметри верхнього шару об'єкту є такими: густина – 7800 кг/м³, модуль Юнга – 1,5·10¹¹ Па, коефіцієнт Пуассона – 0,1.

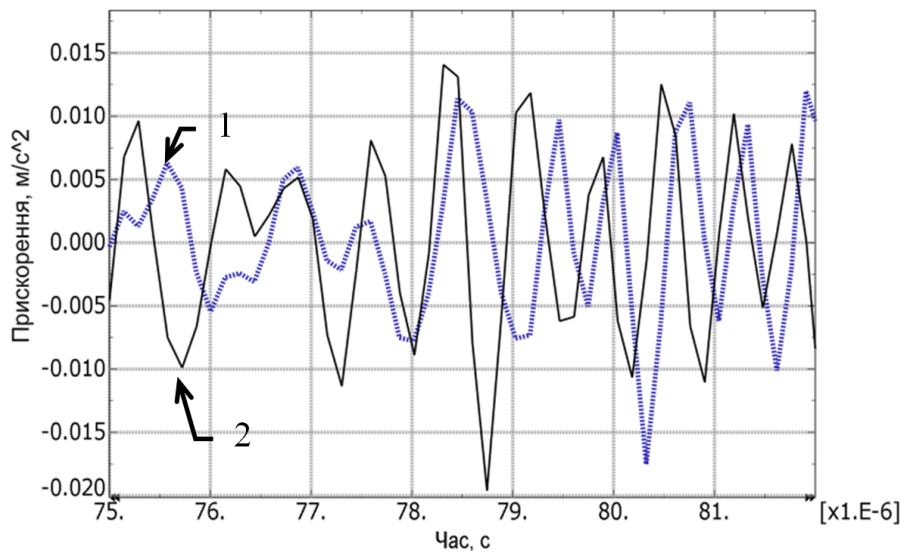
Сигнал ультразвукової хвилі, отриманий у т. 5 (рис. 5), для двох етапів проведення моде-

лювання її поширення представлений на рис. 6. На рис. 6. видно два великі мінімуми сигналу, яким відповідає швидкість ультразвукової хвилі у випадку 1 2538 м/с, а у випадку 2 – 2488 м/с. Швидкість хвилі Релея, обчислена за апроксимаційними рівняннями для пластини, яка повністю виготовлена із матеріалу шару 2 (рис. 1) знаходиться в діапазоні [2620...2641] м/с. Час 2620 м/с відповідає початку хвильового пакету (рис. 6, сигнал 2), який складається із 5-ти коливань, заданих при генеруванні хвилі. Співпадання розрахованих швидкостей поширення хвиль Релея та отриманих методом скінченних елементів дає підстави стверджувати про правильність проведення моделювання. Результат свідчить, що зі збільшенням товщини шару із зміненими фізико-механічними властивостями швидкість поверхневої ультразвукової хвилі зменшується.



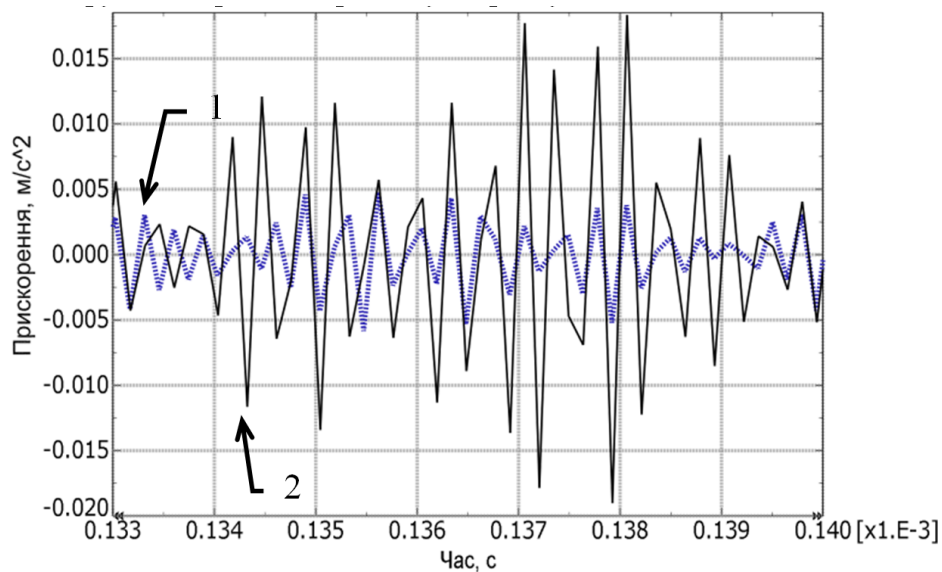
1 – матеріал сталь, 2 – матеріал із зміненими механічними властивостями із товщиною 1 мм, 3 – матеріал із зміненими механічними властивостями із товщиною 0,2 мм, 4 – точка введення ультразвукової хвилі в об'єкт, 5 – точка реєстрації ультразвукової хвилі

Рисунок 5 – Пластина, в якій поширюється ультразвукова поверхнева хвиля



1 – сигнал ультразвукової хвилі з для шару товщиною 1 мм, 2 – для шару товщиною 0,2 мм

Рисунок 6 – Сигнали ультразвукових хвиль



1 – сигнал ультразвукової хвилі з для шару товщиною 1 мм, 2 – для шару товщиною 0,2 мм

Рисунок 7 – Сигнали ультразвукових хвиль

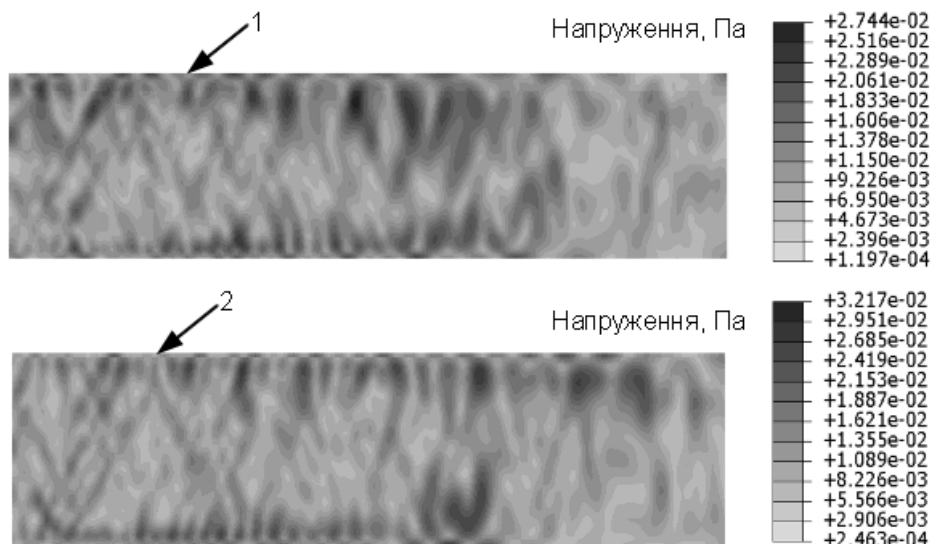


Рисунок 8 – Розподіл напружень в пластині від поширення ультразвукової хвилі

Зі зменшенням товщини поверхневого шару із зміненими фізико-механічними властивостями спостерігали збільшення амплітуди ультразвукової хвилі, швидкість поширення першого хвильового пакету якої складає 1487 м/с, а другого хвильового пакету із найбільшою амплітудою - 1440 м/с. Розподіл напружень при поширення ультразвукової хвилі в пластині показано на рис. 8.

Висновки

В результаті проведення дослідження встановлено, що зі зміною фізико-механічних властивостей поверхні пластини швидкість поширення поверхневих ультразвукових хвиль змінюється. Це дає змогу розробляти методи контролю наявності фізико-механічних змін на поверхні металоконструкцій.

Робота виконана на кошти гранту Президента України GP/F27/0150.

Література

- 1 Edwards R.S. Depth gauging of defects using low frequency wideband Rayleigh waves / R.S. Edwards, S. Dixon, X. Jian // Ultrasonics. – 2006. – V. 44. – p. 93–98.
- 2 Xian-Fang Li. On approximate analytic expressions for the velocity of Rayleigh waves / Xian-Fang Li // Wave Motion. – 2006. – V. 44. – p. 120–127.
- 3 Rose J. Ultrasonic Waves in Solid Media. / Rose J. // Cambridge University Press. – 1999. – 472 p.
- 4 Brekhovskikh L.M. Acoustics of Layered Media: Plane and Quasi-Plane Waves / L.M. Brekhovskikh, O.A. Godin // Berlin: Springer-Verlag. – 1990. – 260 p.
- 5 G.A.D. Briggs. Acoustic Microscopy. Oxford: Clarendon Press. – 1992. – 384 p.
- 6 J. David N. Cheeke. Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves (Pure and Applied Physics). CRC Press.- 2002.- 480 p.
- 7 Документація на пакет програм скінченно-елементного аналізу Abaqus [електронний ресурс]: версія 6.9.1 / Компанія Simulia.- 2009.- 1 електронний оптичний диск (DVD-ROM).- Системні вимоги: Windows XP.- Назва з титул. екрану.

Стаття надійшла до редакційної колегії
09.07.10

Рекомендована до друку професором
Юрчишиним В.М.