

УДК 53.534.2

Георгій Павлович БЛІННІКОВ,
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальнонаукових
та інженерних дисциплін Національної академії Державної
прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького,
м. Хмельницький

Лілія Михайлівна ТРАСКОВЕЦЬКА,
кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри
загальнонаукових та інженерних дисциплін Національної академії
Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького,
м. Хмельницький

Вікторія Миколаївна ШЕВЧУК,
кандидат педагогічних наук, доцент, старший викладач кафедри
загальнонаукових та інженерних дисциплін Національної академії
Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького,
м. Хмельницький

ХВИЛЬОВІ ВЛАСТИВОСТІ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКУ В ПРУЖНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

У роботі досліджено розповсюдження релеївських хвиль у пружних середовищах за допомогою фігур Хладні. Дослідження фігур Хладні показало, що довжина стоячої хвилі залежить від товщини пластинки та механічних властивостей матеріалу пластинки. Здійснено аналіз поширення ультразвукових хвиль (інтерференція, дифракція, дисперсія) у пластинках з різних матеріалів. Показано, що швидкість по-

© Блінніков Г. П., Трасковецька Л. М., Шевчук В. М.

ширення ультразвуку в пластинці пропорційна кореню квадратному з частоти хвилі.

Ключові слова: *ультразвук, фігури Хладні, пружне середовище, швидкість поширення хвилі, частота хвилі, інтерференція, дифракція, дисперсія.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Характерною особливістю сучасного стану фізики і техніки ультразвуку є надзвичайне різноманіття його застосувань, що охоплюють частотний діапазон від звуку, який чують, до гранично досяжних високих частот. Існує великий клас явищ, які характерні тільки для ультразвуку, і їх складно (або взагалі не можна) виявити в області звукових частот. Частина цих явищ прийнято об'єднувати під загальною назвою ефектів другого порядку. До них належать, наприклад, радіаційний тиск, акустичний вітер, ультразвуковий фонтан, тяжіння між частинками в звуковому полі і тому подібне. Високочастотні звукові хвилі, і в першу чергу поверхневі релеївські, сприяли народженню цілої особливої галузі науки і техніки – акустoeлектроніки, що лежить на “стику” високочастотної акустики й електроніки твердого тіла. Акустoeлектроніка вивчає процеси і явища, пов'язані зі збудженням, поширенням і прийомом ультра- і гіперзвукових хвиль різних типів у твердих тілах і їх взаємодією з електронами провідності в кристалах. У технічному плані акустoeлектроніка - це нові типи мініатюрних твердотілих приладів і нові способи опрацювання інформації. Основу акустoeлектроніки складають поверхневі хвилі в кристалах з частотами 10^2 - 10^{10} Гц (довжина хвиль 1000–0,1 мкм). Усе зазначене привело до того, що звукові релеївські хвилі зараз надзвичайно широко вивчаються в багатьох країнах і сукупність праць щодо них складає цілий науковий напрям.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми та на які опирається автор. У 1885 р. лорд Релей (Дж. Стрет) теоретично показав [1], що уздовж плоскої вільної межі ізотропного твердого напівпростору можуть поширюватися пружні поверхневі хвилі, амплітуда яких швидко спадає з глибиною. Відтоді ці хвилі, названі релеївськими, пройшли великий і швидкий

шлях розвитку. Спочатку на дуже низьких частотах (~1–100 Гц) вони використовувалися і детально вивчалися тільки стосовно сейсмології і сейсморозвідки.

У 50-х роках 20-го століття ультразвукові релеївські хвилі з частотами $\sim 10^{10}$ Гц стали інтенсивно використовуватися як засіб усебічного неруйнівного контролю поверхні і поверхневого шару зразків і матеріалів (визначення дефектів, міри і глибини термічного загартування, залишкової механічної напруги, якості обробки поверхні і т. п.) [2–5]. Річ у тому, що швидкість, загасання і структура релеївської хвилі нерозривно пов'язані з механічними, термічними та іншими характеристиками поверхневого шару зразка, в якому вона поширюється. Тому за швидкістю і загасанням релеївської хвилі можна отримувати інформацію про стан поверхневого шару зразка. Окрім техніки, релеївські хвилі ще широко використовуються суто фізичних експериментах як інструмент для вивчення властивостей поверхні і поверхневого шару твердого тіла, включаючи його “електричні” характеристики, наприклад електронні поверхневі стани в напівпровідниковому кристалі. Використання релеївських хвиль відкрило принципово нові можливості. Так, в ультразвуковій дефектоскопії застосування релеївських хвиль зробило ультразвуковий контроль універсальним – застосовним для деталей і заготовель будь-якої форми, оскільки стали доступними для контролю поверхні (плоска і криволінійна) і поверхневого шару зразка. Це дозволило ультразвуковому контролю зайняти провідне місце серед інших методів неруйнівного контролю [6–10].

Метою статті є дослідження поширення релеївських хвиль у пружних середовищах за допомогою фігур Хладні.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досягнення мети роботи насамперед необхідно оцінити особливості досліджуваної задачі.

Особливістю задачі є те, що властивості поверхні і поверхневого шару твердого тіла можна досліджувати, використовуючи фігури Хладні [11, 12].

Фігури Хладні створюються в результаті взаємодії ультразвукових коливань і речовини. Для їх створення був виготовлений магнітострікційний випромінювач низької частоти з феритовими стержня-

ми різної довжини для зміни частоти збуджених на поверхні твердих тіл ультразвукових коливань.

На виготовлених трикутній, прямокутній, шестигранній, круговій пластинках з різних матеріалів при збудженні ультразвуковими коливаннями отримані фігури Хладні (рис. 1–4).



Рис. 1. Хвилі на оргсклі

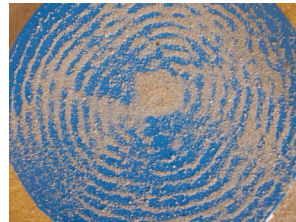


Рис. 2. Кругові хвилі на папері



Рис. 3. Кругові хвилі на оргсклі



Рис. 4. Хвилі на шестигранній пластинці з гетинаксу

Довжину хвилі, що збуджується магнітострикційним випромінювачем, визначимо вимірюванням відстані між сусідніми вузлами хладнієвої картини, і це буде значення напівдовжини хвилі. Довжина хвилі згідно з вимірюванням на інших матеріалах дорівнює: папір – 1 см; гетинакс – 4 см; оргскло – 2 см. Установимо деякі фізичні властивості ультразвукової хвилі на папері. Пересуваючи випромінювач, не відриваючи торця його вібратора від паперового аркуша, відмітимо, як разом з джерелом пересувається по паперу і система кругових хвиль. З'ясуємо, чи відповідає інтерференційна картина досліду, тео-

ретичним висновкам. Згідно з теорією інтерференції хвиль, мінімуми інтенсивності розташовуються в точках, до яких хвилі від джерел приходять з різницею ходу, рівною непарному числу довжин півхвиль

$$\delta = (2\kappa+1) \lambda/2, \quad (1)$$

де $\kappa = 0 \pm 1, \pm 2, \dots$

Геометричні місця таких точок на площині є сімейством гіпербол, у фокусах яких розташовані випромінювачі (рис. 5).

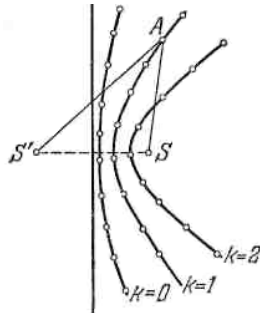


Рис. 5. До вимірювання різниці ходу між інтерферуючими вигинистими хвилями

Отримаємо інтерференційну картину при відбиванні вигинистої ультразвукової хвилі від краю аркуша (рис. 6).

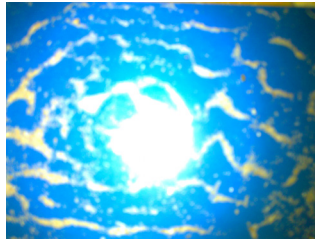


Рис. 6. Інтерференційна картина при збудженні частотою 18,6 кГц

Олівцем позначимо на аркуші отримані лінії мінімумів інтенсивності і положення торця випромінювача. З'єднавши точки плавними лініями, ми отримаємо креслення, подібне зображеному на рис. 5. Нанесемо на це креслення точку S' , симетричну щодо краю аркуша точці

S , в якій вібратор торкається паперу. Якщо припущення, що отримані в експерименті лінії суть гіперболи з фокусом в точці S , вірне, то точка S' – другий фокус сімейства гіпербол. За визначенням гіпербола – геометричне місце точок площини, різниця відстаней яких від двох фокусів є величина постійна.

На будь-якій з ліній креслення виберемо довільну точку. Замірюємо відстані від неї до точок S і S' і знайдемо різницю цих відстаней. Тепер на тій же лінії візьмемо будь-яку іншу точку і для неї виконаємо ту ж операцію. Ми отримуємо результат у межах помилок дослідів, що збігається з першим. Узявши ще декілька точок на вибраній лінії, неважко переконатися, що ця лінія дійсно є гіперболою.

Підрахуємо різниці відстаней від фокусів до точок, що належать різним лініям креслення. Ми відмітимо, що при переході від першої лінії до другої ця різниця збільшується втричі від першої до третьої – у п'ятеро і так далі. Тому для різниці відстаней можна записати експериментальну формулу

$$\delta = (2k+1)a, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

де a — деяка постійна, така, що має розмірність відстані.

Ця експериментальна формула збігається з наведеною вище теоретичною, якщо вважати, що постійна a рівна половині довжини вигинистої хвилі, що розповсюджується в паперовому аркуші.

Побудуємо експериментальну криву для третьої лінії за даними рис. 6. Крім того, скориставшись методом найменших квадратів, за тими ж самими даними побудуємо теоретичну криву.

За методом найменших квадратів коефіцієнти a, b, c шуканої параболі обчислимо, розв'язавши систему рівнянь методами лінійної алгебри:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^4 + b \sum_{i=1}^n x_i^3 + c \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i^3 + b \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i + nc = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (3)$$

Розв'язок цієї системи і визначає єдину параболу $a=0,3961$, $b=0$, $c=22,02597$, тобто $y = 0,3961 x^2 + 22,02597$, яка краще від усіх інших парабол відображає на розглядуваному проміжку теоретичну функціональну залежність. На рис. 7 видно, що теоретична й експериментальна параболы добре збігаються.

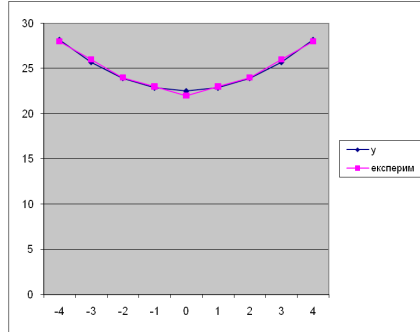


Рис. 7. Експериментальна і теоретична парабола лінії №3

Аналогічно, використовуючи експериментальні дані для всіх трьох ліній, розв'яжемо системи рівнянь виду (3). У результаті отримуємо математичні вирази теоретичних парабол (рис. 8).

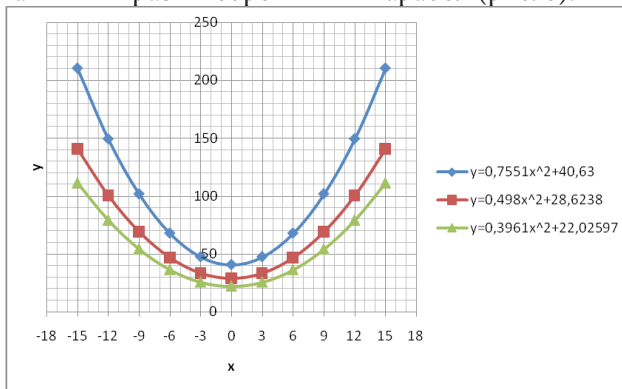


Рис. 8. Криві, які побудовані за експериментальними даними за методом найменших квадратів

Отже, результати дослідження повністю підтверджують теоретичні висновки.

Зробимо дослідження дисперсії швидкості ультразвуку. За вимірними в досліді значеннями різниці ходу для визначеного числа k (порядку інтерференції) визначимо довжину і швидкість вигинистої хвилі, що розповсюджується в паперовому аркуші. З'ясуємо, чи залежить довжина хвилі від відстані між випромінювачем і краєм аркуша. Дослід показує, що довжина вигинистої хвилі не залежить від відстані між торцем випромінювача і краєм паперового аркуша.

Теоретичне вивчення розповсюдження звуку в пластинках показує, що по пластинці розповсюджується вигиниста хвиля, швидкість якої визначається формулою

$$c = \sqrt{\pi d f} \cdot \sqrt[4]{\frac{k}{3\rho(1-\sigma^2)}}, \quad (4)$$

де d — товщина пластинки, f — її частота, ρ — густина матеріалу пластинки, k — модуль пружності і σ — коефіцієнт поперечного стиснення.

Вигиниста хвиля збуджується вібратором, що коливається в напрямку, перпендикулярному до площини пластинки. Тому здається цілком розумним припущення, що вигиниста хвиля поперечна. Так ми і припускали, розглядаючи розповсюдження вигинистої хвилі в паперовому аркуші. Насправді ж, як показують теорія та експеримент, вигиниста хвиля одночасно і повздовжня, і поперечна (рис. 9).

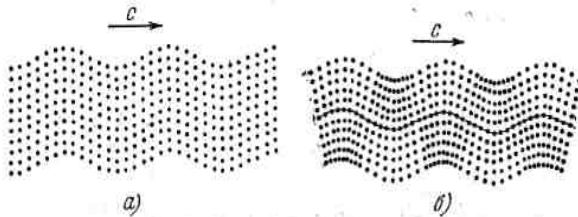


Рис. 9. Схематичні зображення поперечної і вигинистої хвиль:

- а) — у поперечній хвилі коливання частинок твердого тіла відбуваються в напрямку, перпендикулярному до напрямку розповсюдження хвилі;
- б) — вигиниста хвиля одночасно повздовжня і поперечна: частинки пластинки, по якій розповсюджується хвиля, здійснюють складний коливальний рух, що має складові, перпендикулярні і паралельні до напрямку розповсюдження хвилі; чисто поперечна хвиля, як показує схематичний рисунок, розповсюджується суто по середньому перетину пластинки

Порівнявши вираз (4) з формулою (2), неважко побачити, що швидкість звуку в пластинці, на відміну від швидкості ультразвуку в стержні, залежить від частоти або довжини вигинистої хвилі. Таке явище, про яке вже наголошувалося вище, називається дисперсією швидкості ультразвуку. Для кожної даної пластинки величина $\sqrt{\pi d^3} \sqrt{\frac{k}{3\rho(1-\sigma^2)}}$ постійна. Тобто за формулою (4) швидкість звуку в пластинці пропорційна кореню квадратному з частоти. Цей дисперсійний закон можна записати так:

$$c = \sqrt{f}. \quad (5)$$

Оскільки $c = \lambda f$, з формули (4) випливає, що

$$\lambda = 1 / \sqrt{f}. \quad (6)$$

Частоту ультразвуку можна змінювати, застосовуючи у випромінювачі вібратори різних довжин. Основна власна частота вібратора завдовжки l згідно з формулою (1) дорівнює $f = c/2l$, де c – швидкість звуку у фериті. Підставляючи це значення частоти у формулу (6), отримуємо, що $\lambda \approx \sqrt{l}$ (7). Отже, якщо ми експериментально довели, що довжина хвилі в пластинці пропорційна кореню квадратному довжини вібратора, який використовувався для отримання вигинистої хвилі в цій пластинці, то тим самим довели справедливність формули (5) і одночасно переконалися в існуванні дисперсії для вигинистих хвиль.

Виготовленими феритовими вібраторами завдовжки 108, 136, 160, 200 мм збуджуємо коливання в центрі однієї і тій же круглій пластинки. Виміряємо довжини вигинистих хвиль, які відповідають різним частотам.

Далі обробимо отримані результати безпосереднім вимірюванням. Формулу (7) можна переписати у вигляді $\lambda = a\sqrt{l}$, де a — коефіцієнт (після опрацювання експериментальних даних він дорівнює 0,04). Щоб позбавитись від нього, поділимо всі значення довжини вібратора і довжини вигинистої хвилі на найбільші l_m і λ_m . За отриманими дани-

ми нанесемо в декартовій системі координат точки, відповідні експериментальним результатам. Тепер обчислимо значення \sqrt{l} / l_m і побудуємо в тій же системі координат графік функції $y = \sqrt{l} / l_m$. Ми побачимо, що експериментальні точки непогано лягають на теоретично побудований графік (рис. 10).

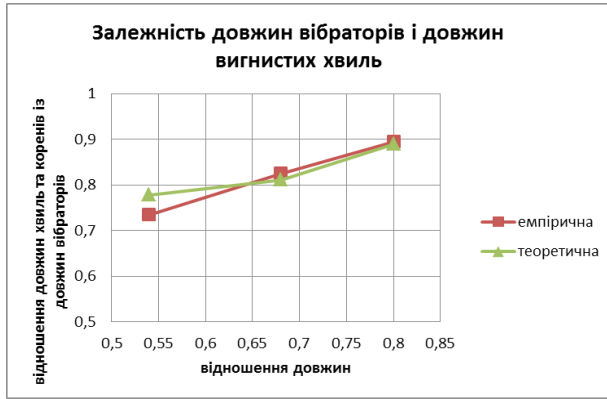


Рис. 10. Залежність значень довжин вібратора і вигинистої хвилі

Тим самим ми довели справедливість формули (7), а значить, і формули (6). Отже, швидкість ультразвуку в пластинці пропорційна кореню квадратному з частоти.

Висновки. У результаті виконання досліджень поширення ультразвуку в пружних середовищах можна зробити такі висновки:

досліджені хвильові властивості (інтерференція, дифракція, дисперсія) ультразвукових хвиль;

дослідження фігур Хладні показало, що довжина стоячої хвилі залежить від товщини пластинки та механічних властивостей матеріалу пластинки;

швидкість поширення ультразвуку в пластинці пропорційна кореню квадратному з частоти.

Перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Використовуючи результати хладнівої хвилі зразка та частоту магнітострик-

ційного вібратора, можна визначити низку фізичних і механічних властивостей різних матеріалів, у тому числі і якість поверхні зразка. Це є завдання майбутніх досліджень релієвських хвиль.

Список використаної літератури

1. Rayleigh. On waves propagated along the plane surface³ of an elastic solid. – Proc. London Math. Soc, 1885, 17, p. 4–11.
2. Шрайбер Д. С. Ультразвуковая дефектоскопия / Д. С. Шрайбер. – М.: Металлургия, 1965. – 391 с.
3. Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия / Б. И. Выборнов. – М.: Металлургия, 1974. – 240 с.
4. Викторов И. А. О влиянии дефектов поверхности на распространение рэлеевских волн / И. А. Викторов. – В кн.: Применение ультразвуковых колебаний для исследования свойств, контроля качества и обработки металлов и сплавов. – К.: Изд-во АН УССР, 1960. – С. 54–61.
5. Гик Л. Д. Измерение вибраций / Л. Д. Гик. – Новосибирск: Наука, 1992. – 291 с.
6. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М.: Изд-во иностр. лит., 1957. – 726 с.
7. Fischler C. Transverse surface wave as high – frequency limit of shear - horizontal piezoelectric plate wave.– Solid State Communs, 1970, 8, N 15, p. 1215–1219.
8. Lee D. A., Corbly D. M. Use of interface waves for nondestructive inspection.– IEEE Trans, on Sonics and Ultrasonics, 1977, SU-24, N 3, p. 206–212.
9. Физическая акустика / под ред. У. Мэзона: М.: Мир, 1973. – Т. 5. – С. 9–71.
10. Maines J. D., Paige E. G. Surface-acoustic-wave components, devices and applications.– IEEE Revs. Inst. Electr. Ensr., 1973, 120, N 10R, p. 1078–1110.
11. A.Dahan-Dalmédico. Mécanique et Théorie des Surfaces: Les Travaux de Sophie Germain. In: Historia Mathematica, 1987, v.14, No.4, pp.347–365.
12. Дайан-Дальмедико Э. Софи Жермен – Scientific American ·Издание на русском языке: № 2, февраль, 1992. – С. 60–66.
13. Ройзман В. П. Анализ современного состояния проблемы обеспечения прочностной надежности изделий электронной техники, применяемой в Госпогранслужбе и министерстве внутренних дел Украины / В. П. Ройзман,

О. Н. Шинкарук // Збірник наукових праць НАДПСУ. Серія : ввійськові та технічні науки. – Хмельницький: Вид. НАДПСУ, 2014 – № 1(61). – С. 394 -408.

Рецензент – кандидат технічних наук, доцент Мул Д. А.

Стаття надійшла до редакції 13.11.2015.

Блинников Г. П., Трасковецкая Л. М. Шевчук В. Н. Волновые свойства распространения ультразвука в упругих средах

В работе исследовано распространение рэлеевских волн в упругих средах с помощью фигур Хладни. Исследование фигур Хладни показало, что длина стоячей волны зависит от толщины пластинки и механических свойств материала пластинки. Осуществлен анализ распространения ультразвуковых волн (интерференция, дифракция, дисперсия) в пластинках из разных материалов. Показано, что скорость распространения ультразвука в пластинке пропорциональна корню квадратному из частоты волны.

Ключевые слова: *ультразвук, фигуры Хладни, упругая среда, скорость распространения волны, частота волны, интерференция, дифракция, дисперсия.*

Blinnikov H. P., Traskovetska L. M., Shevchuk V. M. Wave properties of ultrasound distribution in elastic media

In the fifties of the 20th century the ultrasound Rayleigh waves with frequencies ~1010 Hz started to be used intensively as means of comprehensive, indestructible control of surface and surface layer of samples and materials (determination of defects, measures and depths of thermal temper, residual mechanical stress, quality of processing of surface, etc.). That means that speed, attenuation and structure of Rayleigh waves are inseparably linked with mechanical, thermal and other characteristics of surface layer of a sample in which it extends. Therefore, by the speed and attenuation of Rayleigh waves it is possible to receive information on condition of the sample surface layer. Except for equipment, Rayleigh waves are widely used in purely physical experiments as the tool for studying properties of surface and surface layer of solid body, including its “electric”

characteristics, for example, electronic surface states in semiconductor crystal. Use of Rayleigh waves has opened essentially new opportunities. Thus, in ultrasonic defectoscopy the application of Rayleigh waves has made ultrasonic control universal - applicable for parts and blank parts of any form, as it became possible to control surface (flat and curvilinear) and surface layer of sample. It has allowed the ultrasonic control to take the leading place among other methods of indestructible control. This work considers researches of distribution of Rayleigh waves in elastic media by means of Chladni figures. Research of Chladni figures has shown that length of standing wave depends on thickness of plate and mechanical properties of material of plate. The analysis of distribution of ultrasonic waves (interference, diffraction, dispersion) in plates from different materials has been accomplished. It has been shown that the speed of distribution of ultrasound in the plate is proportional to the square root from the wave frequency.

Keywords: *ultrasound, Chladni figures, elastic environment, speed of wave distribution, frequency of wave, interference, diffraction, dispersion.*