



УДК 534.86
doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-1-20



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Исследование зависимости скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твердом теле от приведенного сечения

Александр Васильевич Рудин

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
rudin1951@mail.ru

Анна Дмитриевна Семенова

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
grace_favour@vk.com

Константин Андреевич Костин

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
kostinkonstantin587@gmail.com

Аннотация. Приводится описание метода измерения и экспериментальной лабораторной установки, позволяющей с высокой точностью определять скорость распространения продольных ультразвуковых волн на высоких частотах методом интерферометра постоянной акустической базы посредством вариации частоты в твердых телах цилиндрической формы в зависимости от приведенного сечения. В основе методики измерения скорости используется явление интерференции когерентных волн с выхода генератора синусоидальных электрических колебаний и ультразвукового высокочастотного импульса, с прямоугольной огибающей, прошедшего через исследуемый образец. Приводятся результаты экспериментальных измерений скорости распространения продольных ультразвуковых волн на частотах $f = 2,6$ и $7,1$ МГц в цилиндрических образцах разного поперечного сечения, изготовленных из стали одной марки.

Ключевые слова: ультразвуковые волны, линия задержки, скорость, частота, генератор, волновод, усилитель, модулятор, интерференция, время задержки, частотомер

Для цитирования: Рудин А. В., Семенова А. Д., Костин К. А. Исследование зависимости скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твердом теле от приведенного сечения // Инжиниринг и технологии. 2024. Т. 9 (1). С. 1–6. doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-1-20

Investigation of the dependence of the velocity of propagation of longitudinal ultrasonic waves in a solid on the reduced cross section

Alexander V. Rudin

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
rudin1951@mail.ru

Anna D. Semenova

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
grace_favour@vk.com

Konstantin A. Kostin

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
kostinkonstantin587@gmail.com

Abstract. The description of the measurement method and the experimental installation is given which makes it possible to determine with high accuracy the propagation velocity of longitudinal



ultrasonic waves at high frequencies by the method of a constant acoustic base interferometer by means of frequency variation in cylindrical solids depending on the reduced cross section. The method of velocity measurement is based on the phenomenon of interference of coherent waves from the output of a sinusoidal electric oscillator and an ultrasonic high-frequency pulse with a rectangular envelope passing through the sample under study. The results of experimental measurements of the propagation velocity of longitudinal ultrasonic waves at frequencies $f = 2.6$ MHz and $f = 7.1$ MHz in cylindrical samples of different cross-sections made of steel of the same brand are also presented.

Keywords: ultrasonic waves, delay line, velocity, frequency, oscillator, waveguide, amplifier, modulator, interference, delay time, frequency meter

For citation: Rudin A.V., Semenova A.D., Kostin K.A. Investigation of the dependence of the velocity of propagation of longitudinal ultrasonic waves in a solid on the reduced cross section. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2024;9(1):1–6. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-1-20

Введение

В настоящее время ультразвуковые линии задержки широко используются в радиолокационной технике для точного определения расстояний до воздушных целей. В качестве ультразвуковой линии задержки обычно используются цилиндрические стержни с плоскопараллельными торцами, изготовленные из плавленого кварца. Время задержки ультразвуковой линии определяется скоростью распространения ультразвукового импульса в цилиндрическом стержне, величина которой определяется плотностью и модулем нормальной упругости материала стержня, а также зависит от поперечного сечения стержня, и рассчитывается по формуле [1]:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}}, \quad (1)$$

где E – модуль нормальной упругости (модуль Юнга), ρ – плотность материала образца, μ – коэффициент Пуассона, величина которого для широкого типа металлов и сплавов лежит в интервале $\mu = 0,3-0,4$. Формула (1) применима только для образцов, диаметр поперечного сечения которых много больше длины волны, распространяющейся в данном образце, т.е. при выполнении условия $d \gg \lambda$, где λ – длина волны ультразвуковых волн в исследуемом образце.

Для цилиндрических образцов, диаметр которых много меньше длины волны, т.е. при выполнении условия $d \ll \lambda$, формула (1) примет упрощенный вид:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (2)$$

Информация о границах применимости формул (1) и (2) в переходной области приведенного сечения, т.е. отношения диаметра стержня к длине волны в литературе отсутствует. Вследствие этого экспериментальное определение зависимости скорости звуковых волн в цилиндрических стержнях от приведенного сечения d/λ является актуальной.

Целью данной работы является экспериментальное исследование зависимости скорости распространения ультразвуковых волн в цилиндрических образцах различного сечения, изготовленных из стали одной марки, на различных частотах: $f_1 = 2,6$ МГц, $f_2 = 7,1$ МГц.

Описание лабораторной установки для измерения скорости ультразвуковых волн в цилиндрических образцах

Блок-схема экспериментальной лабораторной установки, позволяющей с высокой точностью определять скорость распространения продольных ультразвуковых волн на высоких частотах методом интерферометра постоянной акустической базы посредством вариации частоты в твердых телах цилиндрической формы в зависимости от приведенного сечения, показана на рис. 1.

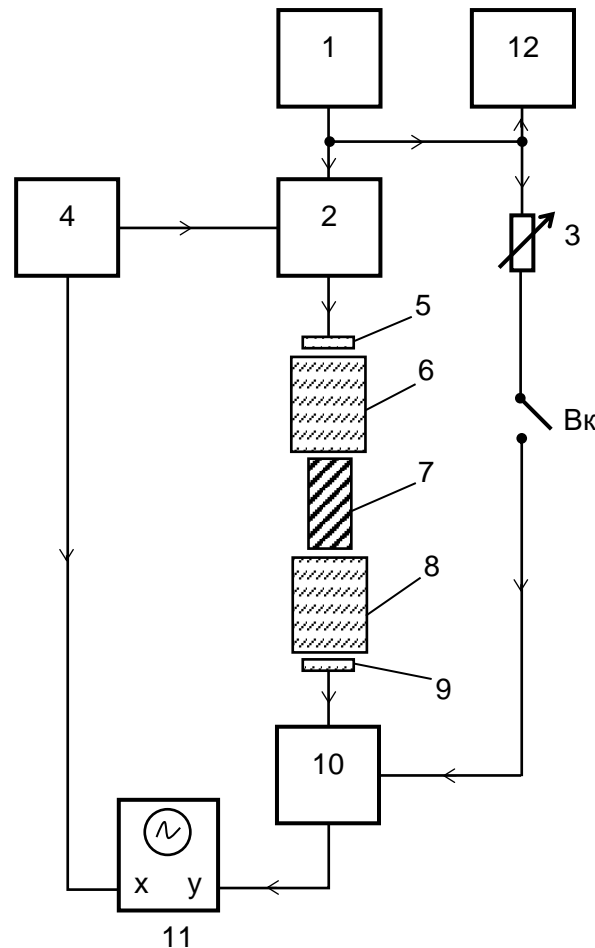


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной лабораторной установки

В основе методики измерения скорости распространения продольных ультразвуковых волн используется явление интерференции когерентных волн, полученных на выходе генератора синусоидальных электрических колебаний и ультразвукового высокочастотного импульса с прямоугольной огибающей, прошедшего через исследуемый образец [2].

Принцип работы акустической лабораторной установки следующий. Электрические колебания синусоидальной формы с выхода высокочастотного генератора 1 (см. рис. 1) поступают на первый вход электронного модулятора 2 и одновременно через аттенюатор 3 и выключатель *Вк* на дополнительный вход усилителя высокой частоты 7. На второй – управляющий вход модулятора 2 поступают прямоугольные импульсы с генератора импульсов 3, а задержанный синхроимпульс поступает на вход горизонтальной развертки *X* осциллографа 11. Высокочастотные радиоимпульсы с прямо-угольной огибающей с выхода модулятора 2 через ВЧ-кабель поступают на пьезоэлектрический преобразователь – излучатель 5, который закреплен на верхнем основании ультразвуковой линии задержки 6, выполненной в форме цилиндра с плоскопараллельными основаниями. Пьезоэлектрический преобразователь 5 преобразует электрические радиоимпульсы в ультразвуковые, которые после прохода через линию задержки 6 через тонкий слой иммерсионной жидкости проходят в исследуемый образец, выполненный аналогично в форме цилиндра с плоскопараллельными основаниями, а затем через тонкий слой иммерсионной жидкости проходит во вторую ультразвуковую линию задержки 8. На нижнем основании линии задержки 8 закреплен пьезоэлектрический преобразователь 9, выполняющий функцию приемника ультразвуковых импульсов, который осуществляет обратное преобразование ультразвуковых импульсов в электрические, которые через коаксиальный ВЧ-кабель подаются на первый вход высокочастотного усилителя – сумматора 10, в котором одновременно осуществляется усиление радиоимпульсов и сложение с непрерывными синусоидальными колебаниями, которые являются когерентными. С выхода усилителя – сумматора 10 результирующие радио-импульсы поступают на вход *У* электронного высокочастотного осциллографа 11, на экране которого наблюдается результат сложения – фазовая компенсация электрических колебаний радиоимпульсов и непрерывных синусоидальных колебаний. Скорость распространения ультразвуковых продольных волн в исследуемом образце рассчитывается по



двум соседним частотам f_n и f_{n+1} , соответствующим условиям фазовой компенсации, т.е. условию минимума интерферирующих когерентных колебаний по формуле:

$$v = \frac{\ell_o}{(f_n - f_{n+1})^{-1} - \tau_3}, \quad (3)$$

где τ_3 – суммарное время задержки в ультразвуковых линиях задержки β и δ .

Фазовая компенсация когерентных волн обеспечивается плавным изменением частоты высоко-частотного генератора I и аттенуатором $З$, с помощью которого обеспечивается равенство амплитуд суммирующих колебаний.

Относительная погрешность измерения скорости продольных ультразвуковых волн в исследуемых образцах цилиндрической формы рассчитывается по ниже приведенной формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta v}{v} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \ell}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \Delta \tau}{\tau - \tau_3}\right)^2}. \quad (4)$$

Для типичного металлического образца цилиндрической формы имеем: $\ell = 50,0$ мм; $\Delta \ell = 0,01$ мм; $\tau_3 \approx 20$ мкс; $\tau \approx 8$ мкс; $\Delta \tau = 0,05$ мкс.

Тогда

$$\varepsilon = \frac{\Delta v}{\langle v \rangle} = \sqrt{\left(\frac{0,01}{52}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot 0,05}{20 - 8}\right)^2} \approx 0,0083.$$

Или в процентах: $\varepsilon\% = 0,83\%$.

Результаты экспериментальных измерений

В качестве исследуемых образцов использовались металлические цилиндрические образцы различного поперечного сечения, изготовленные из углеродистой стали одной марки. Измерение скорости распространения продольных ультразвуковых волн проводилось на частотах $f_1 = 2,6$ МГц и $f_2 = 7,1$ МГц, которые соответствуют первой и третьей гармонике пьезоэлектрических преобразователей, соответственно.

Результаты измерения скорости распространения продольных ультразвуковых волн в исследуемых образцах приведены в табл. 1.

По результатам экспериментальных данных, приведенных в табл. 1, построена графическая зависимость скорости распространения продольных ультразвуковых волн на частотах $f_1 = 2,6$ МГц и $f_2 = 7,1$ МГц в исследованных образцах в зависимости от приведенного сечения d/λ , которая приведена на рис. 2.

Таблица 1

f_n , кГц	f_{n+1} , кГц	ℓ , м	d , м	v , м/с	λ/d
1. 2679,79	2708,78	0,06	0,005	4652	2,9
2. 7124,92	7155,58	0,06	0,005	5415	6,56
3. 2699,95	2730,23	0,06	0,010	5105	5,29
4. 7181,69	7213,63	0,06	0,010	5790	12,16
5. 2573,45	2605,12	0,06	0,030	5969	13,57
6. 7154,63	7186,28	0,06	0,030	5999	35,51

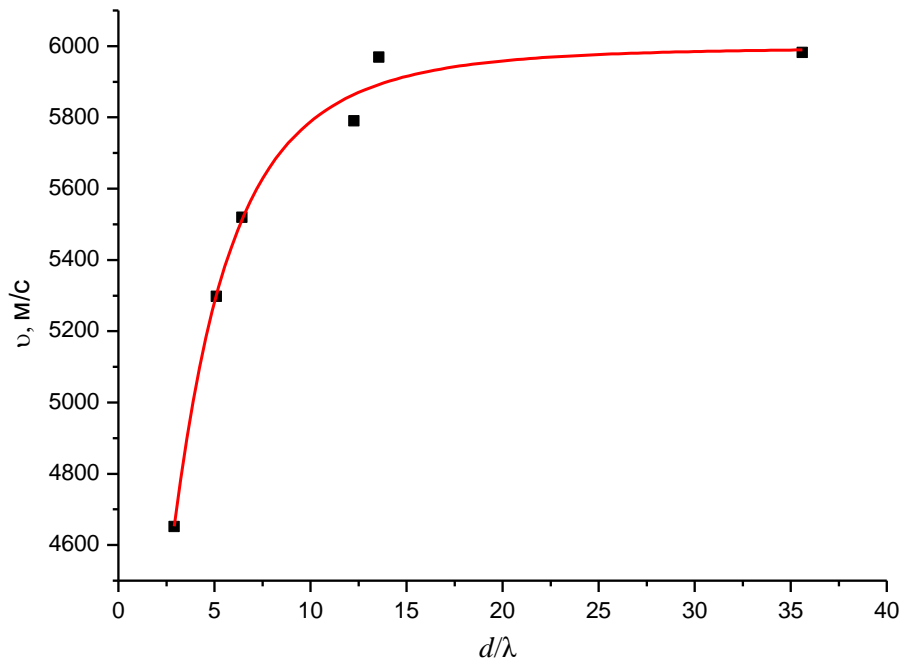


Рис. 2. Зависимость скорости ультразвука в исследуемых образцах от приведенного сечения d/λ

Из приведенного рис. 2 следует, что зависимость скорости распространения продольных ультразвуковых волн во всех исследованных образцах носит нелинейный характер и с увеличением приведенного сечения выходит на горизонтальную асимптоту, что подтверждается теоретическими формулами (1) и (2), приведенными в работе [1]. Кривая зависимости скорости ультразвука от приведенного сечения аппроксимирована логарифмической функцией вида:

$$y = y_0 + A/(\sqrt{2 \cdot \pi I} \cdot w \cdot x) \cdot \exp(-(\ln(x/x_c))^2 / (2 \cdot w^2)).$$

При подставлении численных значений упругих параметров исследуемых металлических образцов в формулы (1) и (2) были получены теоретические значения скорости звуковых волн в стальных образцах для предельных случаев. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

$\rho,$ кг/м ³	$E,$ Па	μ	$v_1,$ м/с	$v_2,$ м/с	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$
7750	$1,75 \cdot 10^{11}$	0,35	4752	6020	2,1	0,3

Здесь $v_1, v_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ – расчетные (теоретические) значения скорости звука в сталях для предельных случаев: $d/\lambda \ll 1$ и $d/\lambda \gg 1$, и соответствующие им отклонения в процентах от экспериментальных значений скорости звука.

Из приведенной табл. 2 следует, что отклонение расчетной величины скорости звука в образцах для предельного случая $d/\lambda \ll 1$ составляет 2,1 %, а для предельного случая $d/\lambda \gg 1$ не превышает 0,3 %, что свидетельствует о высокой точности полученных экспериментальных результатов измерений.

Заключение

1. Разработана методика и конструкция экспериментальной лабораторной установки, позволяющей с высокой точностью определять скорость распространения продольных ультразвуковых волн на высоких частотах в твердых телах цилиндрической формы в зависимости от приведенного сечения.



2. Выведена рабочая формула для расчета скорости ультразвуковых волн методом интерферометра постоянной акустической базы посредством вариации частоты.
3. Проведена оценка относительной погрешности экспериментальных измерений.
4. Проведены экспериментальные измерения скорости распространения продольных ультразвуковых волн на высоких частотах $f = 2,6$ и $7,1$ МГц в цилиндрических образцах одного типа металла, но различного сечения.
5. Из полученных результатов экспериментальных измерений установлено, что с увеличением приведенного сечения исследуемых образцов скорость ультразвуковых волн монотонно возрастает по нелинейному закону и при больших значениях приведенного сечения выходит на горизонтальную асимптоту. Такая зависимость полностью совпадает с теоретическими данными, приведенными в работе [1].

Список литературы

1. Красильников В. А., Крылов В. В. Введение в физическую акустику : учеб. пособие / под ред. В. А. Красильникова. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 400 с.
2. Ганиев Р. Р., Рудин А. В. Определение модуля Юнга твердых тел компенсационным импульсно-фазовым методом вариации частоты // «Физика в системе современного образования» (ФССО-15) : материалы XIII Междунар. конф. Россия, 1–4 июня 2015 г. СПб. : Изд.-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2015. Т. 1. С. 62–65.

References

1. Krasil'nikov V.A., Krylov V.V. *Vvedenie v fizicheskuyu akustiku: ucheb. posobie = Introduction to Physical acoustics : studies. stipend.* Moscow: Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1984:400. (In Russ.)
2. Ganiev R.R., Rudin A.V. Determination of the Young's modulus of solids by the compensatory pulse-phase method of frequency variation. «*Fizika v sisteme sovremennogo obrazovanija*» (FSSO-15): *materialy XIII Mezhdunar. konf. Rossiya, 1–4 iyunja 2015 g. = "Physics in the system of modern education" (FSSO-15) : proceedings of the XIII International Conference. Russia, June 1-4, 2015.* Saint Petersburg: Izd.-vo RGPU im. A.I. Gercena, 2015;1:62–65. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 6.03.2024

Принята к публикации / Accepted 8.04.2024