

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПРОВОЛОК

В. В. МУРАВЬЕВ, А. В. ПЛАТУНОВ

*Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова,  
426069, Ижевск, Россия  
E-mail: vmuraviev@mail.ru*

Представлены результаты исследований по измерению скорости и амплитуды стержневой волны в тонких проволоках с использованием разработанных прибора и установки. Получены значения скорости волн, упругих модулей и акустоупругих коэффициентов по скорости и по амплитуде для ферромагнитных проволок диаметром 0,3—0,5 мм из сталей 65Г, У9А и сплава 52К12Ф. Исследования проводились в условиях одноосного напряженно-деформированного состояния проволок при нагрузках от 0 до 1100 МПа; образцы проволок были подвергнуты отжигу при температуре от 200 до 1200 °С. Полученные результаты могут быть использованы для контроля качества термической и механической обработки стальных проволок.

**Ключевые слова:** *стержневая волна, акустоупругость, термическая обработка, одноосные напряжения, стальные проволоки*

Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния проволок — одна из актуальных задач в современном металловедении, а также в авиационной, машиностроительной и транспортной отраслях промышленности. Перспективные исследования упругих свойств металлов связаны с акустическими методами, основанными на измерении характеристик упругих волн, таких как скорость распространения и затухание, в контролируемой среде [1, 2]. Широко используемый метод акустической тензометрии (акустоупругости) основан на регистрации изменения скорости распространения упругих волн под влиянием напряжений [3—5]. Возможности бесконтактного электромагнитно-акустического (ЭМА) способа ввода и приема акустических волн позволяют исследовать структурное и напряженно-деформированное состояние металлов [6, 7].

В настоящей статье представлены результаты исследований акустоупругих характеристик тонких проволок после отжига и в процессе механического одноосного растяжения.

В линейно-протяженных объектах (продольные размеры которых намного превышают поперечные), например в стержнях, распространяются нормальные волны, открытые Похгаммером и Кри. Нормальные волны в стержнях подразделяются на три типа: продольные, изгибные и крутильные, характеристики которых определяются, наряду с модулями упругости и плотностью материала, частотой  $f$  и диаметром  $d$  стержня. Зависимость фазовой и групповой скорости волн от частоты колебаний и диаметра стержня, характерная для нормальных волн, носит название геометрической дисперсии скорости. На рис. 1 показаны дисперсионные кривые стержневых волн Похгаммера в стальном стержне диаметром 0,3 мм:  $a$  — фазовая скорость,  $b$  — групповая скорость.

Расчет геометрической дисперсии скорости проведен в разработанной авторами программе “Elastic Waveguide Tracer” на основе решения уравнений Похгаммера — Кри (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2013615397: „Программа для исследования волноводного распространения акустических сигналов“).

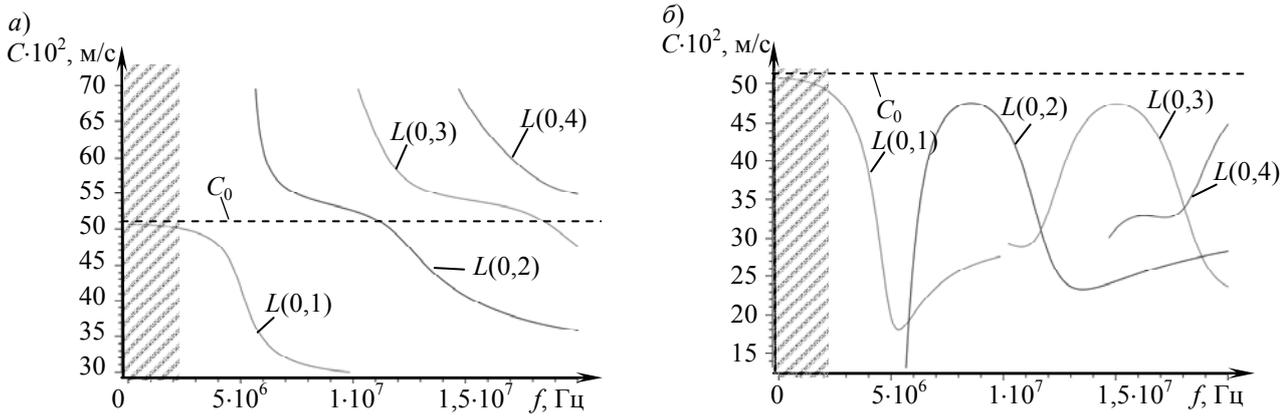


Рис. 1

Использование волн Похгаммера в области значительной дисперсии скорости и существования нескольких мод приводит к искажению и ослаблению сигналов и к сложности их интерпретации [8, 9]. В связи с этим при разработке методов акустических исследований протяженных объектов целесообразно использовать симметричную моду нулевого порядка  $L(0,1)$  в области минимальной дисперсии скорости (малых произведений  $fd$ ).

При  $fd \rightarrow 0$  фазовая и групповая скорости продольной волны  $C_{L(0,1)}$  стремятся к общему пределу — стержневой скорости волн  $C_0$  — и определяются выражением

$$C_0 = \sqrt{E / \rho}, \tag{1}$$

где  $E$  — модуль Юнга,  $\rho$  — плотность.

Принципиальным является то, что нормальные волны в стержнях благодаря волноводному эффекту ослабляются лишь за счет затухания в материале объекта контроля (расхождение отсутствует):

$$U(x) = U_0 e^{-\delta x}, \tag{2}$$

где  $U(x)$  — амплитуда волны при прохождении расстояния  $x$ ;  $U_0$  — начальная амплитуда волны;  $\delta$  — коэффициент затухания.

В области минимальной дисперсии (на рис. 1 заштрихована) затухание волны минимально и прямо пропорционально частоте. Малое затухание и незначительная дисперсия скорости практически не искажают импульсы, распространяющиеся по объекту контроля, что позволяет повысить точность измерений [9].

Для исследования акустоупругих характеристик проволок с использованием ЭМА-способа разработана установка, структурная-схема и внешний вид которой представлены на рис. 2, а, б, где ГЗИ — генератор зондирующих импульсов; И — излучающий ЭМА-преобразователь (ЭМАП); Пр — проволока; М — постоянный магнит; Т — тензодатчик; П — приемный ЭМАП; ПУ — предусилитель; О — осциллограф; ЭИ — электронный измерительный блок; МН — устройство механического натяжения; Ст — станина.

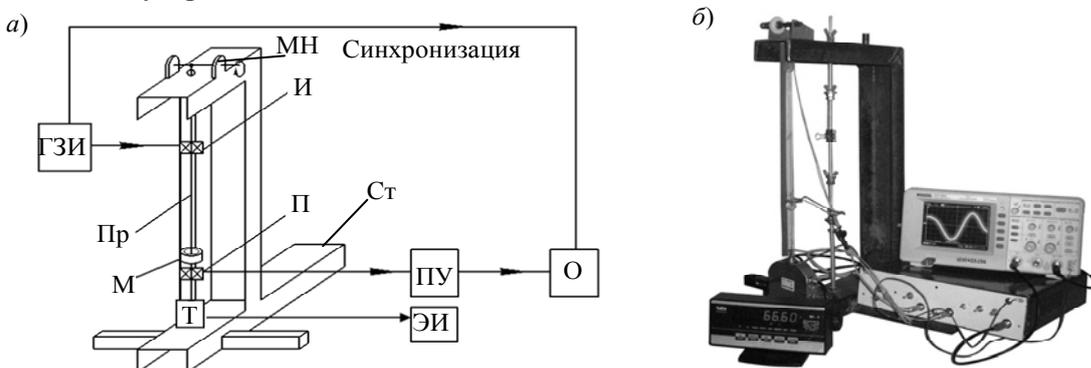


Рис. 2

Для обеспечения одноосного напряженно-деформированного состояния исследуемая проволока закрепляется верхним концом в зажиме устройства механического натяжения, другой конец крепится через шарнирную головку непосредственно к тензорезисторному датчику силы растяжения, жестко закрепленному на станине. Результаты измерений напряжений тензодатчика отображаются на символьном дисплее электронного измерительного блока. Блоки Т и ЭИ являются узлами цифрового калиброванного динамометра ДОР-3-0,3И. В проволоке с помощью излучающего бесконтактного ЭМАП возбуждаются короткие акустические импульсы, которые после прохождения по проволоке регистрируются приемным бесконтактным ЭМАП, преобразующим акустические колебания в электрические импульсы, которые усиливаются предусилителем и наблюдаются на цифровом осциллографе. Генератор зондирующих импульсов, питающий ЭМА-преобразователь И и развертка осциллографа О синхронизированы.

Изменение скорости стержневой волны  $\Delta C/C_0$ , распространяющейся вдоль проволоки с поляризацией в направлении оси  $x$  в условиях одноосных растягивающих напряжений  $\sigma_{xx}$ , может быть описано с помощью акустоупругого коэффициента  $\beta_{xx}^C$  по скорости [3]:

$$\Delta C/C_0 = \beta_{xx}^C \sigma_{xx}; \quad (3)$$

$$\beta_{xx}^C = \frac{15\lambda + 10\mu + 4\lambda^3/\mu + 2(1 + 2m + 2\lambda m/\mu)}{2(3\lambda + 2\mu)(\lambda + 2\mu)},$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  — константы упругости второго порядка Ламе;  $m$  — константы упругости третьего порядка Мурнагана.

На рис. 3 представлены эхограммы контроля проволоки импульсным методом: *a* — зондирующий и принятый импульсы, *б*: 1 — принятый импульс при отсутствии нагружения, 2 — принятый импульс в нагруженном состоянии.

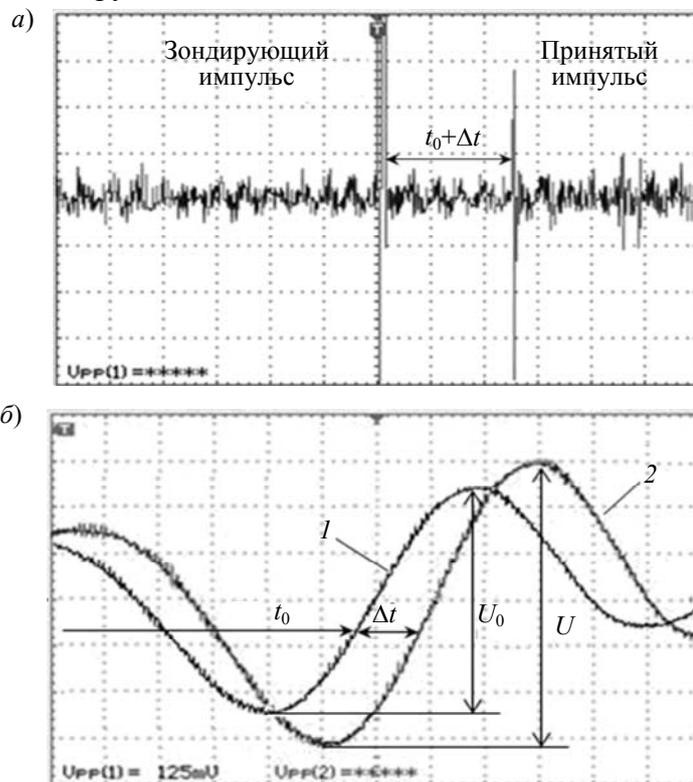


Рис. 3

Информативными параметрами при исследованиях служили амплитуда импульса  $U$  и изменение времени его прихода  $\Delta t$  на расстоянии 250 мм между излучателем и приемником.

По величине относительного изменения скорости  $\Delta C/C_0$  рассчитывались значения акустоупругих коэффициентов по скорости  $\beta_{xx}^C$ :

$$\beta_{xx}^C = \frac{\Delta C / C_0}{\sigma_{xx}} = \frac{\Delta t}{\sigma_{xx} (t_0 + \Delta t)}, \quad (4)$$

где  $\Delta t = t - t_0$  — разница во времени распространения импульса стержневой волны при нагрузке и при ее отсутствии; максимальные значения случайных погрешностей скорости распространения стержневой волны не превышают 0,01 %.

Использование ЭМА-метода позволило ввести новый дополнительный информативный параметр — акустоупругий коэффициент по амплитуде  $\beta_{xx}^U$ , характеризующий эффект возрастания амплитуды стержневой волны при воздействии напряжений и определяемый в основном эффективностью ЭМА-преобразования:

$$\beta_{xx}^U = \frac{\Delta U / U_0}{\sigma_{xx}}, \quad (5)$$

где  $\Delta U = U - U_0$ , а  $U$  и  $U_0$  — амплитуда принятого ультразвукового импульса при нагрузке и ее отсутствии соответственно.

В качестве образцов для исследований были выбраны: проволока диаметром 0,4 мм из пружинной стали 65Г (ГОСТ 11850-72), проволока диаметром 0,5 мм из инструментальной стали У9А (ГОСТ 9389-75), проволока диаметром 0,3 мм из викаллой 52К12Ф (ГОСТ 10994-74). Образцы из сталей 65Г и У9А — рессорно-пружинные проволоки, основное свойство которых — сопротивление малым пластическим деформациям; викаллой относится к дисперсионно-твердеющим сплавам.

Максимальное наблюдаемое изменение скорости для образцов (в состоянии поставки) составляет: для стали У9А —  $\Delta C/C_0 \approx 0,12$  % при нагрузке 950 МПа; для стали 65Г —  $\Delta C/C_0 \approx 0,28$  % при нагрузке 700 МПа; для викаллой —  $\Delta C/C_0 \approx 0,25$  % при нагрузке 1100 МПа.

Исследуемые образцы были подвергнуты отжигу при температуре от 200 до 1200 °С. После высокотемпературного отжига вид зависимостей меняется — их характер ближе к линейному, по всем исследуемым материалам наблюдается уменьшение относительного изменения скорости стержневой волны; полученные значения отличаются от данных, регистрируемых в состоянии поставки образцов и после их низкотемпературного отжига.

В табл. 1 приведены рассчитанные по формулам (4) и (5) соответственно значения акустоупругого коэффициента по скорости  $\beta_{xx}^C$  и акустоупругого коэффициента по амплитуде  $\beta_{xx}^U$  для образцов при различной температуре ( $T$ ) отжига. Расчеты проведены в предположении линейного характера изменения скорости в диапазоне используемых нагрузок. При высокотемпературном отжиге наблюдается увеличение значений коэффициента  $\beta_{xx}^C$  и смена его знака для викаллой.

Таблица 1

$T, ^\circ\text{C}$	$\beta_{xx}^C, 1/\text{ГПа}$			$\beta_{xx}^U, 1/\text{ГПа}$	
	Сталь 65Г	Викаллой 52К12Ф	Сталь У9А	Сталь 65Г	Сталь У9А
Поставка	-2,9	0,1	-0,9	1,0	2,1
200	-3,1	0,1	-1,1	0,8	2,9
400	-2,2	0,9	-1,4	0,2	0,1
600	-4,1	2,1	-1,9	0,1	0,9
800	-14,6	-5,6	-12,0	0,5	0,8
1000	-13,9	-4,6	-12,2	2,8	4,9
1200	-14,1	—	-12,7	4,2	5,8

Экспериментально полученные значения скоростей стержневых волн в исследуемых образцах и табличные значения плотности сталей использованы для расчета модуля упругости  $E$  по формуле (1). Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Материал	Скорость моды $L_0, C_0, \text{м/с}$	Модуль упругости $E, \text{ГПа}$
Сталь 65 Г	5089,8	203
Викаллой 52К12Ф	4968,9	199
Сталь У9А	5213,0	202

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

— применение бесконтактного ЭМА-способа ввода и приема упругих волн позволяет существенно повысить точность, воспроизводимость и достоверность акустических измерений;

— исследования показали возможность использования прибора для измерений абсолютного значения скорости стержневой волны с последующим определением акустоупругого коэффициента по скорости и акустоупругого коэффициента по амплитуде;

— экспериментально полученные результаты измерения скорости и амплитуды стержневой волны в проволоках и расчета модуля упругости исследуемых образцов в состоянии поставки могут быть использованы для контроля качества термической и механической обработки стальных проволок.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при поддержке Российского научного фонда (проект №15-19-00051).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультразвуковая структуроскопия изделий из сложноструктурных материалов на основе анализа статистических характеристик структурного шума / В. Г. Карташев, В. К. Качанов, И. В. Соколов, Е. В. Шалимова, Р. В. Концов, Л. В. Воронкова // Дефектоскопия. 2015. № 6. С. 41—56.
2. Выбор параметров пространственно-временной обработки сигналов при ультразвуковой структуроскопии чугуновых изложниц, подвергшихся термоциклированию / В. К. Качанов, В. Г. Карташев, И. В. Соколов, Л. В. Воронкова, Р. В. Концов, А. А. Синецких // Дефектоскопия. 2016. № 6. С. 42—50.
3. Неразрушающий контроль: Справочник. Т. 4. Акустическая тензометрия / В. А. Анисимов, Б. И. Каторгин, А. Н. Куценко и др. М.: Машиностроение, 2004. 209 с.
4. Клюев В. В., Бобренко В. М., Бобров В. Т. Акустическая тензометрия разъемных соединений. Состояние и перспективы развития. Часть 1. Проблемы эксплуатации конструкций с разъемными соединениями // Контроль. Диагностика. 2015. № 12. С. 60—68.
5. Клюев В. В., Бобренко В. М., Бобров В. Т. Акустическая тензометрия разъемных соединений. Состояние и перспективы развития. Часть 2. Результаты исследований, создания оборудования, разработки методики и примеры применения акустической тензометрии // Контроль. Диагностика. 2016. № 2. С. 14—26.
6. Буденков Г. А., Муравьев В. В., Коробейникова О. В. Исследование напряженно-деформированного состояния ободьев цельнокатаных вагонных колес методом акустической тензометрии // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2009. Т. 6, № 3. С. 111—117.
7. Алехин С. Г., Самокрутов А. А., Бобров В. Т., Бобров С. В., Сергеев К. Л. Моделирование магнитных систем ЭМА-преобразователей для возбуждения ультразвуковых волн // Контроль. Диагностика. 2013. № 7. С. 12—18.
8. Моделирование и исследование процесса распространения акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем, по эллиптическому сечению прутка // О. В. Муравьева, К. В. Петров, М. Ю. Соков, М. А. Габбасова // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 17—23.
9. Муравьева О. В., Стрижак В. А., Пряхин А. В. Влияние регулярных перепадов сечения на контролепригодность прутка при контроле акустическим волноводным методом // Дефектоскопия. 2014. № 4. С. 41—49.

**Сведения об авторах**

- Виталий Васильевич Муравьев** — д-р техн. наук, профессор; ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, кафедра приборов и методов измерений; заведующий кафедрой;  
E-mail: vmuraviev@mail.ru
- Андрей Валерьевич Платунов** — канд. техн. наук; ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, экзаменационный центр по неразрушающему контролю; E-mail: uosp@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
приборов и методов измерений

Поступила в редакцию  
21.03.17 г.

**Ссылка для цитирования:** Муравьев В. В., Платунов А. В. Исследование акустоупругих характеристик тонких проволок // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 7. С. 679—684.

**STUDY OF ACOUSTO-ELASTIC PROPERTIES OF THIN WIRES**

**V. V. Muraviev, A. V. Platunov**

*Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 426069, Izhevsk, Russia*  
E-mail: vmuraviev@mail.ru

Results of studies on measurement of speed and amplitude of rod waves in thin wires, using developed instrument and a setup, are presented. Measured values of velocities, elastic moduli, and acousto-elastic coefficients in speed and amplitude are obtained for ferromagnetic wires with a diameter of 0.3—0.5 mm of steel 65G, U9A and alloy 52K12F. The studies were conducted in the uniaxial stress-strain state of the wire at loads from 0 to 1100 MPa; samples of wires were subjected to annealing at a temperature of from 200 to 1200 °C. The results can be used in quality control of thermal and mechanical processing of steel wires.

**Keywords:** rod wave, acousto-elasticity, thermal processing, uniaxial stress, steel wire

**Data on authors**

- Vitaly V. Muraviev** — Dr. Sci., Professor; Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Department of Quality Control Instruments and Techniques; Head of the Department; E-mail: vmuraviev@mail.ru
- Andrey V. Platunov** — PhD; Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Examination Center for Non-Destructive Testing; E-mail: uosp@mail.ru

**For citation:** Muraviev V. V., Platunov A. V. Study of acousto-elastic properties of thin wires. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 7. P. 679—684 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-7-679-684