

БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА В МЕТАЛЛОКОРДЕ

Кожушко В.В., Сергиенко В.П.

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси», ул. Кирова 32а, г. Гомель 246050, Республика Беларусь
E-mail: info@laser-ultrasound.ru

Задача по определению модуля упругости в процессе производства металлокорда является актуальной и востребованной, поскольку её решение позволит осуществлять технологический контроль выпускаемой продукции. Прохождение стальной проволоки через волоку приводит к значительной пластической деформации и удлинению зёрен, что в свою очередь вызывает изменение не только геометрических размеров, но и упругих свойств проволоки [1]. Скорость ультразвуковых импульсов в проволоке напрямую связана с упругими модулями, и в случае длинноволнового приближения скорость определяется модулем Юнга [2]. Для решения данной задачи предлагается комбинация бесконтактных методов по возбуждению и регистрации зондирующих ультразвуковых импульсов. Возбуждение ультразвука проводится лазерными источниками в результате оптико-акустического преобразования [3], а регистрацию предлагается выполнить с помощью электромагнитных акустических (ЭМА) преобразователей [4-6].

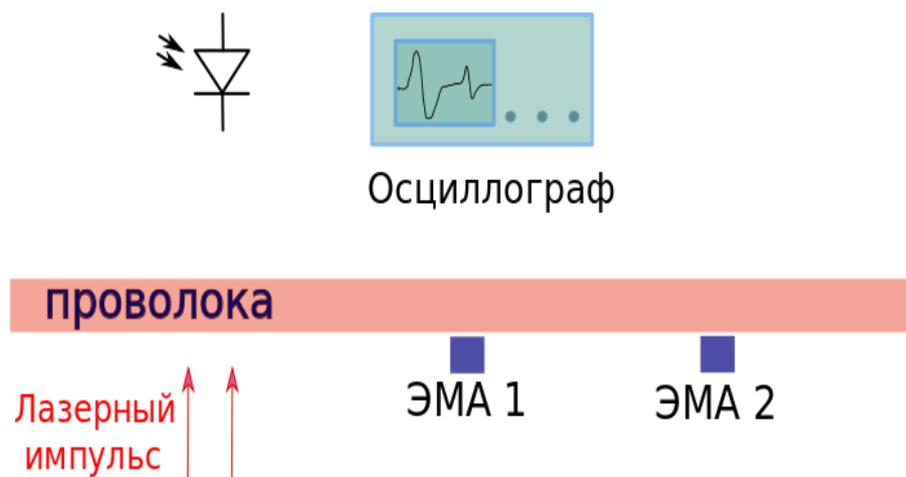


Рисунок 1 – Схема проведения эксперимента

Для проведения экспериментов по определению модулей Юнга в стальной проволоке были подготовлены образцы, диаметр которых составлял от 0,225 мм до 1,8 мм и длина более 250 мм. Торец проволоки шлифовали нормально к её оси, за исключением проволоки диаметром 0,225 мм. Схема предлагаемого эксперимента представлена на Рис. 1. Расстояние между ЭМА-преобразователями составляет 23 мм. Фронт сигнала фотодиода использовали для запуска осциллографа.

В качестве источника оптического излучения использовали белорусско-японский лазер LOTIS Tii, модели LS-2131M-10. Нефокусированное излучение лазера освещало свободный участок проволоки, диаметр лазерного пятна приблизительно 6 мм. Энергия лазерного импульса составляла приблизительно 10 мДж на длине волны 532 нм. Длительность лазерных импульсов составляла приблизительно 12 нс, частота повторения лазерных импульсов – 10 Гц. Проволока до начала экспериментов подмагничивалась постоянным кольцевым магнитом с полем 0,25 Т и следующими размерами: внешним диаметром 25 мм, внутренним 13 мм, толщиной 3 мм. В результате лазерного воздействия в проволоке возбуждаются ультразвуковые импульсы, распространяющиеся в противоположные стороны. Поскольку лазерное пятно достаточно протяжённое и имеет гауссовское распределение интенсивности, спектральный состав ультразвукового импульса охватывает область низких частот, что

соответствует случаю длинноволнового возбуждения. Регистрация ультразвука выполняется в двух точках ЭМА преобразователями, чувствительный элемент которых представляет из себя промышленную индуктивность с ферритовым сердечником и номинальным значением 10 мкГн, резонансной частотой 26 МГц, и линейными размерами 2,5x2,5x2 мм³. Особенностью ЭМА преобразователей является чувствительность к переменному электромагнитному полю, вызванному распространением ультразвуковых импульсов. В электрической схеме индуктивности включены в цепь дифференциальных усилителей, выполненных на операционных усилителях. Печатная плата изготовлена с минимальной длиной проводящих дорожек, что является необходимым для уменьшения паразитных индуктивностей и ёмкостей. Простота изготовления ЭМА-преобразователя делает его применение экономически привлекательным для решения задач диагностики механических свойств и неразрушающего контроля металлов и композитов на их основе [7]. Промышленные индуктивности уменьшают размер преобразователей и локализуют их пространственную чувствительность по сравнению с катушками, изготавливаемыми вручную из лакированного медного провода, что позволяет сопоставить пространственное разрешение данных преобразователей с разрешением оптических методов [8].

Для стержней характерна дисперсия распространяющихся ультразвуковых волн. В стержне или проволоке длинноволновые моды имеют предельно высокую скорость распространения по сравнению с коротковолновыми, скорость которых приближается к скорости Рэлеевских – поверхностных волн, распространяющихся по поверхности проволоки вдоль оси. Задача по определению скорости длинноволновых продольных импульсов может быть сведена к определению скорости распространения на участке достаточной длины с применением двух ЭМА-преобразователей, расположенных вдоль проволоки с минимальным зазором, на рисунке 2 представлены результаты измерения в образце бронзированной проволоки диаметром 1,6 мм стали 90K+Cr.

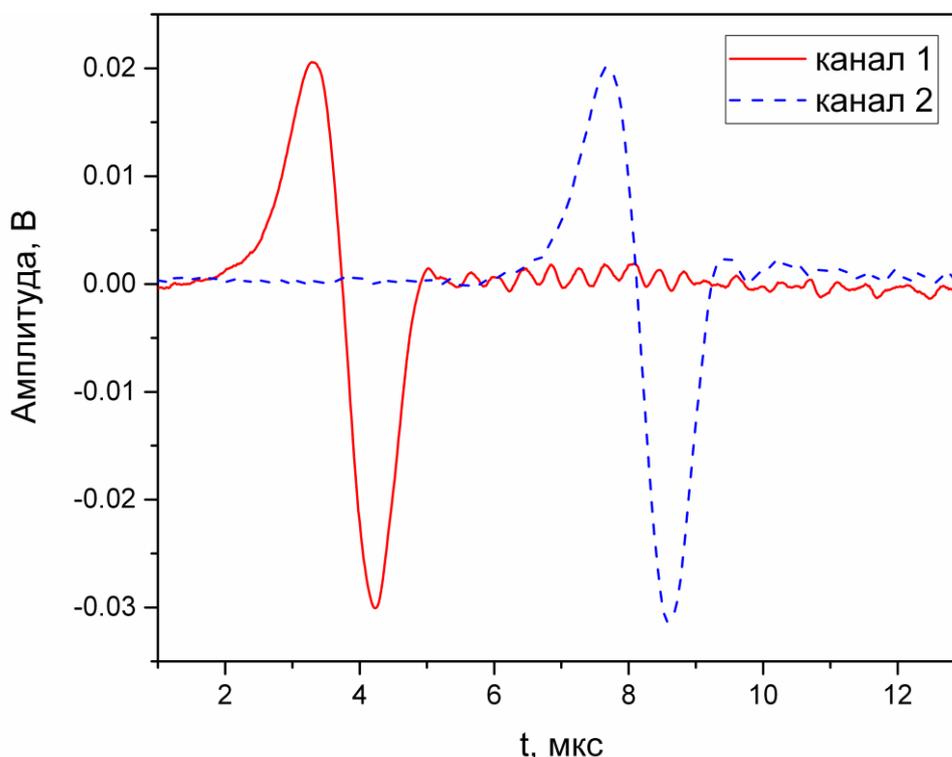


Рисунок 2 – Сигналы измеренные двумя ЭМА-преобразователями, сплошная линия – первый канал, пунктирная – второй канал

Таким образом, регистрируется импульс, распространяющийся из точки возбуждения к преобразователям. Измерения делают возможным определение групповой скорости распространения ультразвука в проволоке. Время пробега

импульсом расстояния 23 мм между преобразователями определили по точкам пересечения базовой линии, что дало значение $dt = t_2 - t_1 = 4,399$ мкс для времени, скорость равна 5,23 км/с. Спектр импульсов ограничен сверху частотой 1,5 МГц, что подтверждает предположение о длинноволновом приближении возбуждаемых импульсов. Скорость длинноволновых импульсов в проволоке определяется из соотношения модуля Юнга и плотности материала. Модуль Юнга проволоки нашли при известной плотности материала ρ , равной 7,8 г/см³ из выражения:

$$E = V^2 \rho \quad . \quad (1)$$

Полученное значение модуля Юнга равно 213 ГПа, что хорошо согласуется с табличным значением 210 ГПа.

Точность измерения групповой скорости определяется точностью измерения времени пробега импульса и точностью измерения расстояния между датчиками. Абсолютная ошибка измерения времени пробега импульса составляет 20 нс, абсолютная ошибка измерения расстояния 0,1 мм. Относительная ошибка измерений для скорости равна сумме относительных ошибок измерения времени и расстояния, которые составляют приблизительно 0,25% и 0,5% для интервала времени 4,4 мкс и отрезка длиной 23 мм, таким образом, относительная ошибка измерения скорости составляет 0,75%. Для рассмотренного образца проволоки скорость длинноволновых ультразвуковых мод составила $5,23 \pm 0,04$ км/с. Относительная ошибка измерения модуля равна сумме удвоенной ошибки измерения скорости и плотности, и она ограничена величиной в 2%. Значения модуля, полученные в проволоке различных диаметров 0,225 мм, 1,33 мм, 1,4 мм, 1,5 мм, 1,6 мм и 1,8 мм находятся в диапазоне от 209 ГПа до 215 ГПа.

В заключении отметим, что предложенный подход может быть использован для проведения диагностики металлической проволоки через измерение модуля Юнга. Бесконтактный метод возбуждения в сочетании с бесконтактным методом регистрации могут быть реализованы непосредственно на производственной линии, что позволит контролировать изменение параметров и регулировать качество продукции при производстве металлокорда.

Литература

1. Коробов А.И., Экономов А.Н. Влияние термической обработки и статических деформаций на акустическую нелинейность медных проволок. // Акуст. журн. 2002. Т.48. №5. С. 640-648.
2. Thurston R.N. Elastic waves in rods and clad rods // J. Acoust. Soc. Am. 1978. V. 64, No. 1. July P. 1-37
3. Гусев В. Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика, М.: Наука, 1991, 304 с.
4. Кожушко В.В., Палтауф Г., Кренн Х. Регистрация наносекундных оптико-акустических импульсов в стали // Акуст. журн. 2013. Т. 59. №2. С. 279-282.
5. Hirao M., Ogi H. EMATs for science and industry: non-contacting ultrasonic measurements. Boston: Kluwer Academic Publisher, 2003. p. 372.
6. Rueter D. Induction coil as a non-contacting ultrasound transmitter and detector: Modeling of magnetic fields for improving the performance // Ultrasonics. 2016. V. 65. P. 200-210.
7. Кожушко В.В., Сергиенко В.П., Мышковец В. Н. Определение модулей металлических композитов бесконтактной регистрацией оптико-акустических импульсов // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2017. № 5. С. 1751001-4.
8. Kim J., Jhang K.-Y. Non-contact measurement of elastic modulus by using laser ultrasound // Int. J. Precis. Eng. Manuf., 2015. V.16. No5. P. 905-909.