

## Определение модулей металлических композитов бесконтактной регистрацией оптико-акустических импульсов

В.В. Кожушко<sup>1,\*</sup>, В.П. Сергиенко<sup>1,†</sup>, В.Н. Мышковец<sup>2,‡</sup>

<sup>1</sup>Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого»  
Республика Беларусь 246050, Гомель, ул. Кирова, д. 32а

<sup>2</sup>Гомельский государственный университет имени Ф.Скорины  
Республика Беларусь 246019, Гомель, ул. Советская д. 104, кор. 5  
(Статья поступила 07.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Технология композитных материалов — быстро развивающееся и перспективное направление в решении эксплуатационных, экономических и экологических задач по замещению материалов предыдущих поколений. Определение упругих свойств композитов на этапе разработки необходимо для подтверждения их соответствия предъявляемым требованиям. В работе показаны возможности измерения скорости продольных и сдвиговых ультразвуковых импульсов, возбуждаемых в результате оптико-акустического преобразования в металлических композитах. Особенностью предлагаемого подхода является бесконтактная регистрация ультразвука электромагнитным акустическим преобразователем.

PACS: 43.58.+z 46.80.+j 62.20.de 81.70.Cv

УДК: 534.08:620.179.16

Ключевые слова: оптоакустика, лазерный ультразвук, неразрушающий контроль, композиты, диагностика, сдвиговые импульсы, упругие модули, бесконтактная регистрация.

### ВВЕДЕНИЕ

Определения модулей композитов возможно в результате прямого измерения скорости ультразвуковых импульсов [1]. Бесконтактные методы являются наиболее востребованными и перспективными как для промышленного применения, так и для лабораторных исследований свойств композитов. Электромагнитные акустические (ЭМА) преобразователи экономически очень привлекательны, поскольку их конструкция использует одну или несколько катушек из медного провода, размещенных в поле постоянного магнита [2]. Применение ЭМА преобразователей не требует механической подготовки поверхности исследуемого образца, так как магнитное поле проникает через неметаллические неоднородности, загрязнения, пыль и оксиды. Возбуждение высоких частот ЭМА преобразователями ограничивается скин-слоем, связанным с глубиной проникновения электромагнитного поля в проводник; кроме того, эффективность преобразования быстро уменьшается с увеличением зазора между исследуемым образцом и катушкой. Лазерные методы, основанные на оптико-акустическом преобразовании, используют для возбуждения в металлах прецизионных ультразвуковых импульсов [3]. Эффективность преобразования оптического излучения наносекундной длительности в ультразвук зависит от теплофизических свойств материалов и параметров лазерного излучения, а именно: от длительности импульса и формы пятна на поверхности поглощающего материала. Спектр

возбуждаемых ультразвуковых импульсов охватывает диапазон от сотен килогерц до ста мегагерц и превосходит по параметру ширины полосы традиционные источники, что принципиально улучшает разрешающую способность диагностических методов. В лабораторных условиях комбинация лазерного возбуждения с ЭМА преобразователями показывает убедительное превосходство в решении задач ультразвуковой диагностики с высоким временным разрешением [4].

### 1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате воздействия лазерного импульса возбуждаются поверхностные и объемные импульсы, при этом эффективность преобразования и диаграммы направленности объемных импульсов различны [5]. Диагностика поликристаллических металлов продольными ультразвуковыми импульсами по схеме на рис. 1,а, может быть выполнена в большинстве случаев [4]. Цель работы — измерение в металлических композитах скорости продольных и сдвиговых волн, при локализации источников в результате фокусировки излучения цилиндрической линзой согласно схеме на рис. 1,б.

Сталь марки 40Х, бронза БрА5, дюралюминий Д16 и медь М1 выбраны в качестве материалов для образцов, изготовленных в форме полудисков толщиной 5 мм и диаметром 20 мм на токарно-фрезерном станке, рис. 2. Точность изготовления образцов не хуже 0.1 мм, материалы не подвергали термообработке. Плотность образцов измерена методом гидростатического взвешивания: сталь 40Х — 7800 кг/м<sup>3</sup>, бронза БрА5 — 8315 кг/м<sup>3</sup>, медь М1 — 8950 кг/м<sup>3</sup> и дюралюминий Д16 — 2765 кг/м<sup>3</sup>, точность измерения 10 кг/м<sup>3</sup>.

\*E-mail: kozhushko@laser-ultrasound.com

†E-mail: sergienko\_vp@mail.ru

‡E-mail: myshkovets@gsu.by

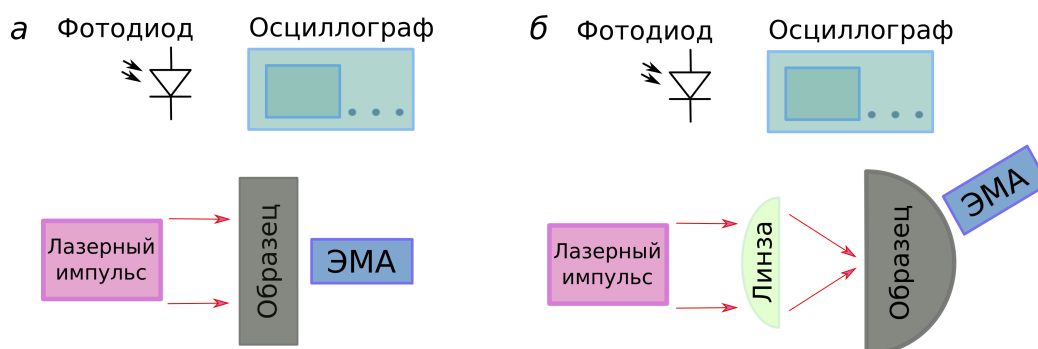


Рис. 1: Схемы: а — экспериментального расположения для бесконтактного возбуждения и регистрации преимущественно продольных импульсов и б — возбуждения продольных и сдвиговых ультразвуковых импульсов в металлах

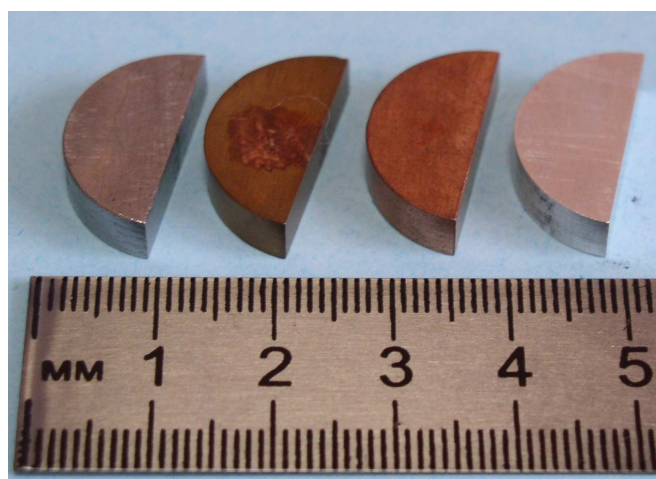


Рис. 2: Образцы толщиной 5 мм и радиусом 10 мм, изготовлены из материалов слева направо: сталь 40Х, бронза БрА5, медь М1, дюралюминий Д16

Конструкция ЭМА преобразователя включает плоскую катушку диаметром 5 мм из десяти витков лакированного медного провода  $\varnothing 0.15$  мм и постоянного NdFeB магнита толщиной 3 мм с внутренним и внешним диаметром 13 мм и 25 мм, соответственно. Поле постоянного магнита менее 0.25 Тл. Катушка преобразователя размещена в центре магнита на минимальном расстоянии от платы предварительного усилителя, выполненной на одном операционном усилителе AD8099, применение которого необходимо для согласования и передачи высокочастотного сигнала по коаксиальному кабелю на вход осциллографа. Катушка, предварительный усилитель и магнит размещены в алюминиевом корпусе. Преобразователь чувствителен только к переменному электромагнитному полю, вызванному ультразвуковыми импульсами, которое в случае металлических композитов связано с действием силы Лоренца на вихревые токи и/или магнитоstrictionным эффектом в ферромагнитных металлах, при этом вклад последнего в результирующий сигнал больше [3]. Неоспоримое преимущество ЭМА преобразо-

вателей — это простота изготовления и стоимость, поскольку чувствительным элементом является отрезок медной проволоки, а процесс их изготовления значительно проще, чем, например, процесс изготовления пьезоэлектрических преобразователей.

Для возбуждения ультразвука использовалось излучение Nd:YAG лазера компании LOTIS Tii модели LS-2131M-10, работающей в режиме модулированной добротности на длине волны 532 нм, с энергией в импульсе порядка 10 мДж и длительностью  $< 10$  нс при частоте повторения 10 Гц. Сигналы ЭМА преобразователя регистрировали осциллографом с верхней границей аналоговой полосы 200 МГц при частоте дискретизации 1 ГГц. Для регистрации момента воздействия лазерного импульса на поверхность образца использовали фотодиод Hamamatsu S5971-1. Лазерное излучение фокусировалось цилиндрической линзой диаметром 25 мм с фокусным расстоянием 60 мм на плоскую поверхность образца, как показано на рис. 1, б. Абляционный режим возбуждения сопровождался незначительным испарением материала и отпечатком на поверхности. Позиционирование фокусированного пятна вдоль оси цилиндра обеспечивалось микрометрическим столиком. В диаграмме направленности продольных импульсов максимум находится вдоль нормали к поверхности. Сдвиговые импульсы поляризованы в плоскости рисунка, а максимум их интенсивности в диаграмме направленности образует угол с нормалью к поверхности образца [5]. Спектры ультразвуковых импульсов теряют низкие частоты преимущественно из-за дифракции, а высокочастотную часть — из-за поглощения и рассеяния на границах зерен [6, 7].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Примеры оптико-акустических сигналов, измеренных в образцах, приведены на рис. 3. Среди рассмотренных образцов в дюралюминии Д16 рассеяние ультразвука минимально, и измеренный сигнал содержит продольный и сдвиговый импульсы. С точки зрения ультразвуковой диагностики сталь — это наибо-

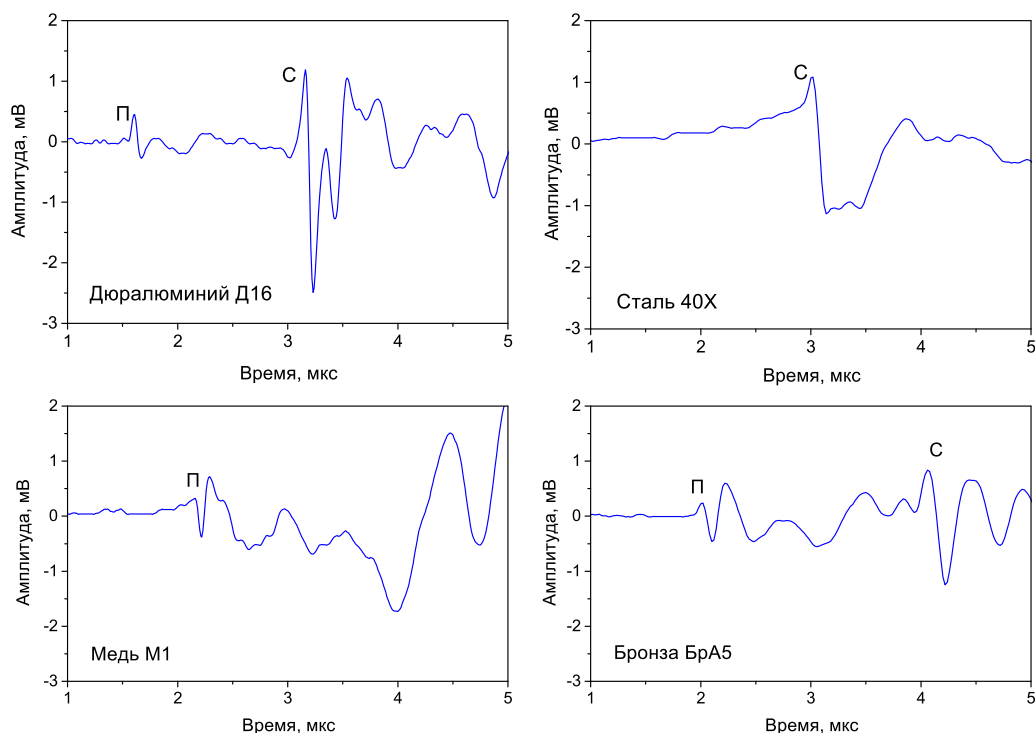


Рис. 3: Примеры оптико-акустических сигналов, зарегистрированных в подготовленных образцах, П отмечает продольный импульс, С — сдвиговый импульс

Таблица I: Скорость измеренных продольных и сдвиговых импульсов и соответствующие модули

| Материал    | $v_{\text{П}}$ , км/с | $M$ , ГПа | $v$ , км/с | $G$ , ГПа |
|-------------|-----------------------|-----------|------------|-----------|
| Сталь 40Х   | —                     | —         | 3.21       | 80        |
| Медь М1     | 4.60                  | 189       | —          | —         |
| Бронза БрА5 | 4.85                  | 196       | 2.41       | 48        |
| Дюраль Д16  | 6.15                  | 105       | 3.16       | 28        |

более сложный материал из-за значительной анизотропии свойств, микроструктуры и композиционного состава. Подход не позволил зарегистрировать продольный импульс, что объясняется сильным рассеянием. В меди после продольного импульса преобразователь регистрирует рассеянное ультразвуковое поле, в котором сложно выделить сдвиговый импульс. Сигнал, полученный в образце бронзы, содержит оба импульса. Полный размах амплитуды измеренных импульсов не превышает 4 мВ, при этом верхняя граница спектра ограничена осциллографом частотой 20 МГц, что компенсируется бесконтактной методикой. В точке пересечения импульса с базовой линией определяли время, затраченное на 10 мм пробега.

Определив, где это было возможно значения объемных скоростей в образцах, рассчитали упругие модули для продольных и сдвиговых волн согласно выражению:

$$M = \rho v_{\text{П}}^2, G = \rho v_{\text{С}}^2 \quad (1)$$

здесь  $M$  и  $G$  — модули продольной и сдвиговой волн, соответственно,  $\rho$  — измеренная плотность материала,  $v_{\text{П}}$  и  $v_{\text{С}}$  — скорость продольных и сдвиговых волн. Результаты измерений и расчета представлены в табл. 1.

Относительная ошибка измерения скорости складывается из относительной ошибки для расстояния, пробегаемого импульсом,  $\approx 1\%$  и относительной ошибки измерения времени пробега  $\approx 0.5\%$ . Таким образом, ошибка измерения скорости не превышает 2%, а модулей — 4%. Рассеяние ультразвука в поликристаллических материалах обусловлено анизотропией свойств отдельных зерен, ориентированных случайным образом, а измеренные значения скорости усреднены по объему образца. Рассеяние проявляется через преобразование исходных импульсов в сдвиговые и продольные волны, в результате в объеме образца помимо зондирующих импульсов распространяются волны, связанные с его микроструктурой. Особенность рассеяния в поликристаллах — это когерентное излучение

на значительном расстоянии от источника, что ограничивает регистрацию высоких частот [6]. В ряду металлов, составляющих основу рассмотренных образцов, у алюминия минимальная анизотропия, что отчасти объясняет его популярность при демонстрации возможностей диагностических методик. В случае измерений только продольных импульсов микроструктурный шум приближается к преобразователю с задержкой. Амплитуды сдвиговых импульсов и рассеянных волн могут быть сопоставимы, одновременно приближаясь к преобразователю, как, например, в случае с образцом меди. Представленная в прошлом веке теоретическая работа связала затухание ультразвука с размером зерен и частотой упругих волн [7]. Решение обратной задачи, представляющей несомненный интерес, т.е. определение среднего размера зерна по результатам измерения затухания сталкивается со сложностями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена экспериментальная схема оптико-акустического преобразования наносекундных лазерных импульсов, фокусированных цилиндрической линзой, для одновременного эффективного возбуждения продольных и сдвиговых ультразвуковых импульсов в металлических композитах, имеющих форму половины дисков. Регистрация ультразвуковых импульсов выполнена ЭМА преобразователем, размещённым вблизи цилиндрической поверхности образцов. По измеренным значениям скорости и плотности определены упругие модули. Продолжение работ, комбинирующих лазерное возбуждение и бесконтактную регистрацию ультразвука, позволит развить новые подходы и методики для решения задач неразрушающего контроля и диагностики композитных материалов.

- 
- [1] Карабутов А. А., Подымова Н. Б., Черепецкая Е. Б. Прикладная механика и техническая физика. 2013. **54**, № 3. С. 181.
- [2] Hirao M., Ogi H. EMATs for Science and Industry: Noncontacting Ultrasonic Measurements. Springer, 2003.
- [3] Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991.
- [4] Кожушко В. В., Палтауф Г., Кренн Х. Акуст. журн. 2013. **59**, № 2. С. 268.
- [5] Kim J., Jhang K.-Y. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2015. **16**. N 1. P. 905.
- [6] Tourin A., Derode A., Fink M. 1999 IEEE Ultrason. Symp. Proceedings. Int. Symp. (Cat. No.99CH37027). 2000. **1**. P. 711.
- [7] Stanke F. E., Kino G. S. J. Acoust. Soc. Am. 1984. **75**. P. 665.

---

## Measurement of metal composites moduli by non-contact detection of optoacoustic pulses

V. V. Kozhushko<sup>1,a</sup>, V. P. Sergienko<sup>1,b</sup>, V. N. Myshkovets<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup>V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus. Gomel 246050, Belarus

<sup>2</sup>Department of Radiophysics and Electronics, Faculty of Physics, F. Skoriny Gomel State University. Gomel 246019, Belarus  
E-mail: <sup>a</sup>kozhusko@laser-ultrasound.com, <sup>b</sup>sergienko\_vp@mail.ru, <sup>c</sup>myshkovets@gsu.by

Technology of composite materials is fast developing and promising direction for solution of operational, economic and ecological tasks of substitution of previous generations' materials. Measurement of the elastic properties of the composites during their development is necessary to confirm that they meet requirements. The paper shows possibilities of measurement of velocities of longitudinal and shear pulses, which are induced by optoacoustic conversion in metallic composites. The feature of suggested approach is non-contact detection of ultrasound by electromagnetic acoustic transducer.

PACS: 43.58.+z 46.80.+j 62.20.de 81.70.Cv.

**Keywords:** optoacoustics, laser-induced ultrasound, non-destructive testing, composites, diagnostics, shear pulses, elastic moduli, non-contact detection.

Received 07 July 2017.

## Сведения об авторах

1. Кожушко Виктор Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (375) 232-71-91-04, e-mail: kozhusko@laser-ultrasound.com.
2. Сергиенко Владимир Петрович — канд. техн. наук, доцент, зав. отделом; тел.: (375) 232-77-35-75, e-mail: sergienko\_vp@mail.ru.
3. Мышковец Виктор Николаевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой; тел.: (375) 232-57-88-54, e-mail: myshkovets@gsu.by.