

ДИАГНОСТИКА МЕТАЛЛОВ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ

¹Кожушко В. В., ¹Сергиенко В. П., ²Митюрин Г. С., ³Мышковец В. Н.

¹*Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого, г. Гомель*

²*Белорусский торгово-экономический университет потреб. кооперации, г. Гомель*

³*Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, г. Гомель, Беларусь*

kozhusko@laser-ultrasound.com

Решение задач ультразвуковой диагностики металлов связано с измерением скорости распространения и затухания упругих волн, что позволяет оценить микроструктурные изменения размера и текстуры зёрен, межфазовые переходы. В последнее десятилетие методы использующие ультразвуковые импульсы, возбуждаемые лазерными импульсами наносекундной длительности в результате оптико-акустического (ОА) преобразования, находят применение при решении задач неразрушающего контроля материалов и в медицинской диагностике [1, 2]. Неоспоримым преимуществом методов является бесконтактное возбуждение широкополосных импульсов, что позволяет проводить дефектоскопию и контроль упругих свойств без использования материалов, обеспечивающих акустический контакт, что актуально, например, в условиях повышенной температуры или при перемещении объекта исследования. Коммерческие установки, использующие лазерное возбуждение ультразвука и последующую бесконтактную регистрацию на основе фоторефрактивных кристаллов, - пример высокотехнологичного и дорогого оборудования, удовлетворяющего данным требованиям [3]. В лабораторных условиях можно исследовать металлы и композиты ОА импульсами в комбинации с традиционными, бюджетными методами регистрации: пьезоэлектрическими и/или электромагнитными акустическими (ЭМА) преобразователями [4].

При известных условиях, возбуждаемые ОА импульсы имеют ярко выраженную фазу сжатия [5], что является дополнительным преимуществом, позволяющим увеличить пространственную разрешающую способность методов, по сравнению с импульсами, получаемыми в традиционных ультразвуковых преобразователях. В работе рассмотрены плоскопараллельные пластинки, для которых была реализована «прямая» схема регистрации, т.е. место возбуждения ОА сигнала и преобразователь находятся на противоположных поверхностях. Возбуждение продольных импульсов давления на поверхности исследуемых образцов проводилось импульсным Nd:YAG лазером, работающим на длине волны $\lambda = 1,064$ мкм в режиме модулированной добротности, с частотой 5 Гц. Диаметр пятна лазерного пучка на поверхности образца был ~6 мм, энергия в импульсе <15 мДж, плотность мощности не превышала 10 МВт/см². Длительность лазерного импульса была измерена фотодиодным преобразователем и составляла менее 5 нс, что позволило оценить спектр ОА импульса диапазоном от 500 кГц до 200 МГц. Оценка эффективности преобразования в металлах даёт значение ≤ 1 Па/(Вт/см²) [5]. Электрический сигнал оцифровывался осциллографом, с частотой дискретизации 1 ГГц и вертикальным разрешением 8 бит. Измеряемые сигналы усреднялись по 256 реализациям для уменьшения шума электроники, что обеспечивало динамический диапазон измерений более 40 дБ. Синхронизация измерений осуществлялась фотодиодом.

Рассмотрим регистрацию ОА импульса в стальной пластинке толщиной 0.4 мм с помощью самодельного пьезоэлектрического преобразователя на основе поляризованной плёнки поливинилиденфторида (ПВДФ). Чувствительный элемент преобразователя имеет диаметр 2 мм и толщину 25 мкм. Между стальной пластиной и поверхностью преобразователя находился слой воды толщиной 2 мм, что обеспечивало акустический контакт. На освещаемой поверхности пластинки также находилась вода, что увеличивало эффективность ОА преобразования в области низких частот по сравнению со свободной поверхно-

стью [5]. Зарегистрированный ОА сигнала представлен на Рис. 1. Импульс достигает поверхность преобразователя через $\sim 1,4$ мкс с момента поглощения лазерного излучения. После двойного отражения на границах с водой регистрируются первый эхо-сигнал. В общем случае амплитуда эхо уменьшается ввиду затухания, связанного с рассеянием на границах зёрен и поглощением части энергии системой дислокаций, и потерями на отражение при прохождении границ. Измерения в нескольких точках пластинки позволили определить скорость распространения продольных волн, равную $5,75 \pm 0,03$ км/с. Измеренный спектр ОА импульса имеет локальный минимум вблизи 100 МГц, соответствующий длине волны, равной толщине плёнки. Увеличение поглощения в воде пропорционально квадрату частоты, согласно $\alpha = 25 \times 10^{-5} / (\text{см} \cdot \text{МГц}^2)$ [6], что принципиально ограничивает диапазон иммерсионного метода.

Бесконтактная регистрации широкополосных ОА импульсов в металлах, помещённых в постоянное магнитное поле, может быть выполнена ЭМА преобразователями, чувствительными к переменному электромагнитному полю, возникающему в проводящих

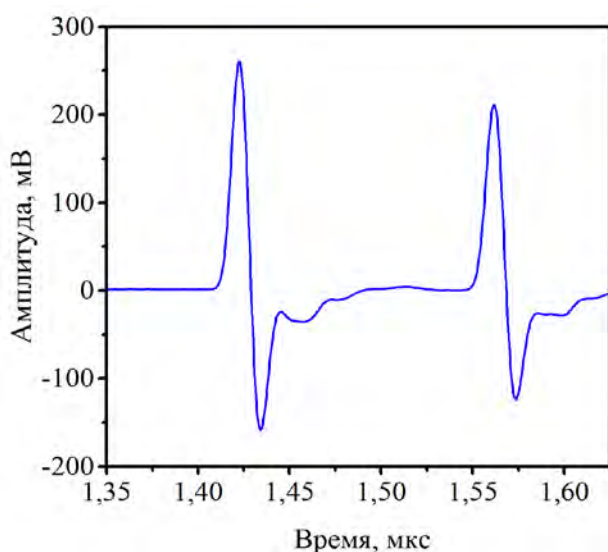


Рис.1. ОА сигнал, зарегистрированный в стальной пластинке ПВДФ преобразователем

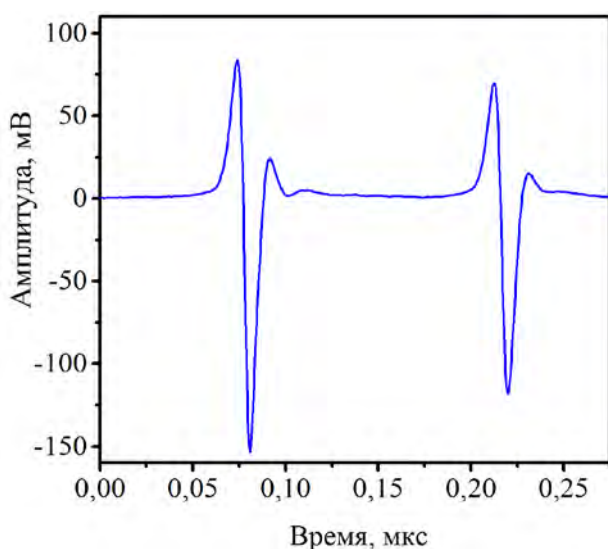


Рис.2. ОА сигнал, полученный в стальной пластинке ЭМА преобразователем

и/или ферро-магнитных материалах на свободной границе. Для регистрации продольных ОА импульсов был разработан и изготовлен ЭМА преобразователь, в основе которого лежит плоская катушка диаметром менее 6 мм, имеющая 10 витков медной лакированной проволоки $\varnothing 0,15$ мм. Оценки индуктивности катушки дают значение приблизительно 0,2 мкГн. Катушка была припаяна к печатной плате неинвертирующего усилителя, имеющего коэффициент усиления 25 дБ с верхней границей по уровню -3 дБ на частоте ~ 150 МГц. В электрической схеме катушка, соединённая последовательно с резистором номиналом 50 Ом, находится между положительным входом операционного усилителя и электрической «землёй». Рассчитанная добротность контура имеет значение менее 10 для частоты 200 МГц. Катушка помещалась в середине постоянного цилиндрического NdFeB магнита, с измеренным значением поля магнитной индукции равным 0,25 Т, имеющего внешний диаметр 25 мм и внутренний 13 мм. На рис. 2. представлен ОА сигнал, полученный в стальной пластинке толщиной 0,4 мм. ОА импульс достигает тыльной стороны пластинки через $\sim 0,07$ мкс, затем с таким же интервалом, как и в случае ПВДФ преобразователя, регистрируются отражение меньшей амплитуды. Фурье анализ сигнала показал наличие в спектре основного импульса частот выше 200 МГц, при динамическом диапазоне измерений, составившем более 40 дБ, что соответствует проведённым оценкам.

Ток, возбуждаемый в катушке, пропорционален производной магнитного потока по времени. В металлах переменное электромагнитное поле возникает в результате действия сил Лоренца на вихревые токи и/или в результате действия сил на вектор намагниченности.

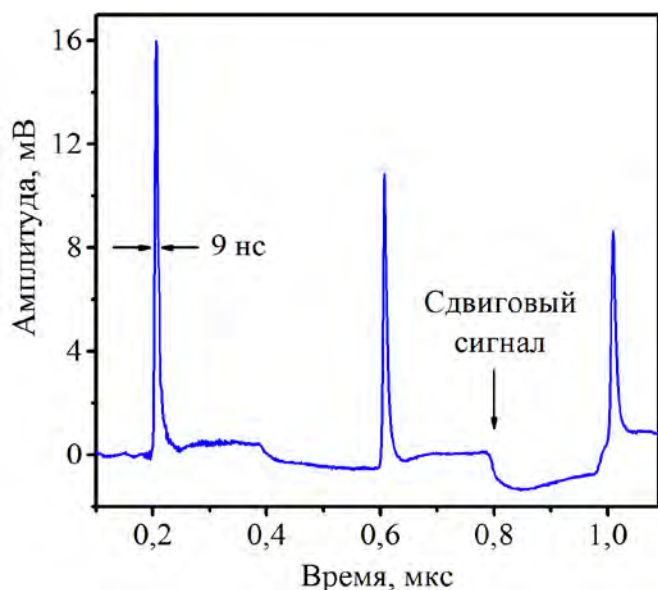


Рис. 3. ОА сигнал в монокристаллической алюминиевой пластинке толщиной 1,25 мм, полученный ЭМА преобразователем

В случае ферромагнитных материалов доминирующий вклад в переменное электромагнитное поле связан с обратным магнитострикционным эффектом [7]. ОА сигнал, измеренный ЭМА преобразователем в монокристаллическом Al (001) алюминиевом диске толщиной $1,25 \pm 0,01$ мм, показан на рис. 3. Форма ОА импульса в регистрируемом сигнале представляет собой однополярный пик длительностью порядка 9 нс. Изменение формы ультразвукового пучка в результате дифракции приводит к появлению сдвигового сигнала. В пределах ошибки измерений скорость звука $6,29 \pm 0,03$ км/с равна справочному значению скорости в направлении [100] 6,284 км/с [6]. Попытки измерить ОА сигнал в поли-

кристаллическом алюминии оказались неудачными, что объясняется сильным затуханием вихревых источников на границах зёрен.

Таким образом, показаны возможности регистрации широкополосных ОА импульсов в диапазоне от 0,5 до 200 МГц, который сопоставим с диапазоном измерений оптических методов и значительно превосходит рабочую полосу частот традиционных ультразвуковых преобразователей. При этом, ЭМА преобразователь является простым и дешёвым решением, потенциально позволяющим получить информацию о упругих, магнитных и структурных свойствах металлов.

Список литературы

1. Pelivanov, I. NDT of fiber-reinforced composites with a new fiber-optic pump-probe laser-ultrasound system / T. Buma, J. Xia, C.-W. Wei, M. O'Donnell // *Photoacoustics* – 2014. – Vol. 2, N2. – P. 63-74.
2. Wang, L.V. Photoacoustic tomography: in vivo imaging from organelles to organs / L.V. Wang, S. Hu // *Science* – 2012. – Vol. 335. – P. 1458-1462.
3. Dynamic real time and non-contact grain size measurement; <http://tecnar.com/index.php/lumet>
4. Kozhushko, V.V. Detection of laser-induced nanosecond ultrasonic pulses in metals using a pancake coil and a piezoelectric sensor / V. V. Kozhushko, H. Krenn // *T-UFFC IEEE* – 2012. – Vol. 59, N 6. – P. 1233-1238.
5. Гусев, В.Э. Лазерная оптоакустика/ В.Э. Гусев, А.А. Карабутов – М.: Наука, 1991. – 304 с.
6. Физические величины: Справочник / под ред. Григорьева И.С.–М.: Энергоатомиздат, 1991.
7. Hirao, M. EMATs for science and industry: noncontacting ultrasonic measurements / M. Hirao, H. Ogi, – Boston: Kluwer Academic Publisher, 2003. – 372 p.