

## ИЗМЕРЕНИЕ МОДУЛЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ ЛАЗЕРНЫМ УЛЬТРАЗВУКОМ

Кожушко В.В., Сергиенко В.П.

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого» НАН Беларуси,  
г. Гомель, Беларусь, E-mail: info@laser-ultrasound.com

Разрабатываемые металлические композиты замещают материалы предыдущих поколений. Измерение упругих модулей новых материалов – важная задача материаловедения, решение которой необходимо, чтобы подтвердить соответствие фактических свойств значениям, требуемым в конструкциях и изделиях. Свойства металлических композитов в значительной степени определяются материалом, составляющим основу объёма или матрицу. Свойства поликристаллических материалов зависят как от композиционного состава, так и от среднего размера зёрен, которые являются анизотропными кристаллитами. В отсутствие текстуры на макроскопическом уровне свойства поликристаллов не зависят от направления в силу *статистической* изотропности. Упругие модули связаны с плотностью и скоростями ультразвуковых волн – сдвиговых и продольных, согласно выражениям:

$$M = \rho V_L^2, G = \rho V_S^2, \quad (1)$$

где  $M$  и  $G$  модули продольных и сдвиговых волн,  $\rho$  – плотность, а  $V_L$  и  $V_S$  – скорость продольных и сдвиговых волн, соответственно. В расчётах обычно используют модуль Юнга и коэффициент Пуассона, которые также можно определить, зная плотность и скорости продольной и сдвиговой волн [1].

Целью настоящей работы является демонстрация возможностей применения лазерных методов для возбуждения ультразвуковых импульсов в металлических композитах и их последующая регистрация широкополосными преобразователями. В результате оптико-акустического преобразования в металлических композитах возбуждаются всевозможные упругие импульсы, при этом для успешного решения задачи, связанной с их регистрацией, используются различные подходы. Самая распространённая и простая схема измерения «на просвет», в которой лазером облучается одна сторона плоскопараллельной пластинки, а регистрация ультразвука происходит с противоположной стороны. В случае пьезоэлектрических преобразователей между образцом и преобразователем должен быть обеспечен акустический контакт, что требует механической обработки поверхности и наличия тонкого соединительного жидкого слоя, толщину которого сложно контролировать. Ультразвуковой импульс испытывает значительные искажения формы и спектра при прохождении через границу раздела сред, что можно минимизировать в случае иммерсионной методики, когда образец погружается в воду. Такая схема может быть использована для измерений скорости продольных импульсов в большинстве материалов. Если поглощение оптического излучения в исследуемом образце незначительно, то применяют внешние «генераторы» – пластинки сильно поглощающих пластиков, в которых возбуждается зондирующий продольный импульс, а затем направляется в исследуемый образец. Для регистрации широкополосных ультразвуковых импульсов используется преобразователь на основе поляризованной плёнки поливинилиден фторида (ПВДФ) толщиной 25 мкм с диаметром чувствительного элемента 2 мм. Для передачи сигнала по коаксиальному кабелю на вход осциллографа, реализован неинвертирующий усилитель с коэффициентом  $\approx 27$  дБ на одном операционном усилителе LMH 6624, при этом ёмкость чувствительного элемента включена параллельно сопротивлению на неинвертирующем входе [2]. Преобразователь работает в «коротко-замкнутом» режиме, при котором регистрируемый сигнал пропорционален производной импульса давления по времени.

В качестве примера на рисунке 1 приведён сигнал, измеренный в образце поликристаллической меди. Начало отсчёта для времени пробега устанавливается по нарастающему фронту сигнала фотодиода в момент облучения поверхности образца лазерным импульсом. Затухание амплитуды сигналов связано с поглощением

(преобразованием в тепло) и рассеянием ультразвука в результате преломления и отражения на границах акустически анизотропных зёрен. Рассеяние проявляется через преобразование зондирующего импульса в продольные и сдвиговые волны, распространяющиеся в направлениях, отличных от зондирующего импульса, и создающие «микроструктурный шум». Площадь ПВДФ-преобразователя позволяет усреднить рассеянные волны и снижает влияние «микроструктурного шума».

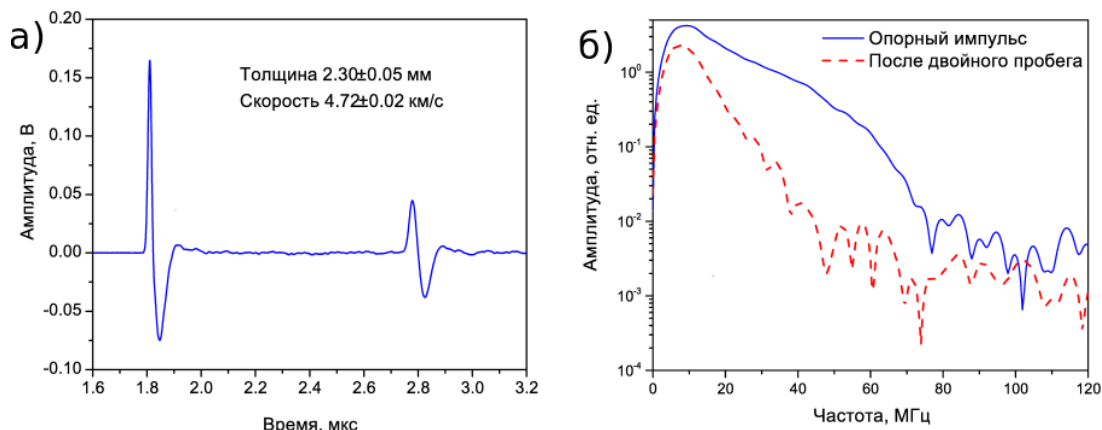


Рисунок 1 – Продольные ультразвуковые импульсы, зарегистрированные ПВДФ-преобразователем в поликристаллической меди (а) и спектры этих импульсов (б)

Электромагнитные акустические (ЭМА) преобразователи делают возможной регистрацию зондирующих ультразвуковых импульсов бесконтактным методом, что в совокупности с простотой реализации и низкой стоимостью представляется очень привлекательным для решения диагностических задач [3]. Комбинация лазерного возбуждения продольных импульсов с регистрацией ЭМА-преобразователем была рассмотрена в ряде работ, продемонстрировавших возможности расширения рабочего диапазон частот и улучшения разрешающей способности метода в задачах диагностики свойств [4]. Для возбуждения поверхностных импульсов излучение лазера фокусируется в отрезок цилиндрической линзой, в этом случае плотность мощности может превышать порог абляции и эффективность возбуждения обоих типов объёмных импульсов увеличивается, однако диаграммы направленности продольных и сдвиговых будут значительно отличаться. По схеме, представленной на рисунке 2,а, можно измерить значение обеих скоростей, локализовав источники вдоль оси образующей цилиндрической поверхности. Ультразвуковые импульсы воздействуют через силы Лоренца на вихревые токи и индуцируют переменное электромагнитное поле, которое регистрирует ЭМА-преобразователь у поверхности.



Рисунок 2 – Схема локализованного возбуждения импульсов (а). Образцы меди и бронзы (б)

Радиус цилиндрической поверхности образцов равен 10 мм, а толщина – 5 мм. В эксперименте излучение лазера фокусировалось цилиндрической линзой в отрезок длиной  $\approx 4$  мм и шириной порядка 0.1 мм, позиционирование пятна вдоль оси выполнялось микрометрическим столиком. В результате абляции материала на поверхности остаются незначительные отпечатки. Малые размеры источника приводят к потерям низкочастотной части спектра из-за дифракции. Потери высоких частот происходят из-за поглощения и рассеяния, разделить которые в эксперименте

затруднительно. Анизотропия упругих свойств монокристаллических зёрен материалов определяет интенсивность рассеяния в поликристаллах. Рассчитанное для кубических монокристаллов отношение Ценера  $\eta = 2C_{44} / (C_{11} - C_{12})$  у меди составляет 3,2, у железа – 2,5 и у алюминия – 1,2. Модули поликристаллических материалов получаются в результате усреднения модулей зёрен, ориентированных случайным образом [3]. Таким образом, интенсивность рассеяния выше для микроструктуры с более крупным средним размером зерна. В рассматриваемом диапазоне рассеяние увеличивается с частотой. Спектр зондирующего импульса сужается с увеличением расстояния от источника, что приводит к уменьшению полного размаха амплитуды измеряемых сигналов. Приведённые на рисунке 3 сигналы показывают, что продольный импульс опережает сдвиговый импульс и рассеянное ультразвуковое поле. В образце бронзы определяются продольный и сдвиговый импульсы, а в сигнале, полученном в образце меди, выделить сдвиговый импульс затруднительно, что можно объяснить более существенным рассеянием. Полученные значения скорости согласуются с известными справочными значениями.

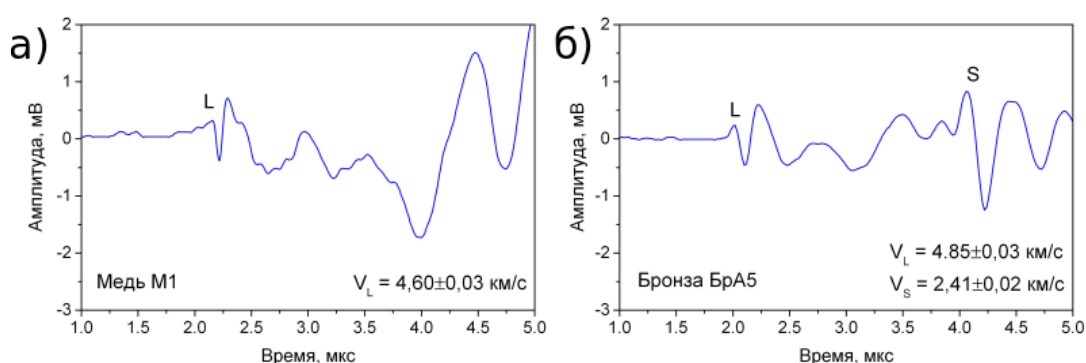


Рисунок 3 – Примеры сигналов, литеры L и S отмечают продольные и сдвиговые импульсы

В работе показаны подходы по применению оптико-акустического преобразования наносекундных лазерных импульсов в металлических композитах для измерения скорости продольных и сдвиговых импульсов, и последующего определения упругих модулей материалов. Бесконтактная регистрация возбуждаемого лазером ультразвука представляется перспективной для решения задач неразрушающего контроля и диагностики свойств.

#### **Список литературы:**

1. Ультразвуковой контроль материалов. Справ. изд. Й. Крауткремер, Г. Крауткремер; Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991. – 762 с.
2. Kozhushko, V. V. Broadband optoacoustic measurements of ultrasound attenuation in severely plastically deformed nickel / V.V. Kozhushko, G. Paltauf, H. Krenn, S. Scheriau, R. Pippan // J. Appl. Phys. – 2010. Vol. 107. – P. 094905-1-9.
3. Hirao, M. EMATs for science and industry: noncontacting ultrasonic measurements / M. Hirao, H. Ogi, – Boston: Kluewer Academic Publisher, 2003. – 372 p.
4. Кожушко, В.В. Регистрация наносекундных оптико-акустических импульсов в стали / В.В. Кожушко, Г. Палтауф, Х. Кренн // Акуст. журн. – 2013. т. 59. – с. 279-282.