

РЕГИСТРАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО УЛЬТРАЗВУКА МАССИВОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**Кожушко В.В.¹, Сергиенко В.П.¹, Мышковец В.Н.²**¹*Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель, Республика Беларусь, vkozhusko@mail.ru*²*Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины», г. Гомель, Республика Беларусь*

Металлические композиты замещают материалы предыдущих поколений, чем вызывают повышенный интерес материаловедов. Измерение упругих модулей новых материалов – важная задача, 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. Кроме этого свойства поликристаллических материалов зависят как от композиционного состава, так и от среднего размера зёрен, которые являются анизотропными кристаллитами. Перспективным представляются методы диагностики композитных материалов с использованием ультразвуковых импульсов, скорость распространения и затухание которых существенно зависит от микроструктуры. Основными сложностями экспериментальных методов является возбуждение и регистрация коротких зондирующих импульсов в диапазоне частот наиболее оптимальном для исследований. Недостатки контактных методов связаны с требованиями по подготовке поверхности и обеспечением акустического контакта, через наличие тонкого слоя звукопроводящей жидкости, контролировать толщину которого сложно. Кроме того, диаметр контактного пятна должен быть достаточным, что делает затруднительным проведение измерений в образцах малых размеров. Альтернативой контактному методу является оптико-акустическое преобразование для возбуждения зондирующих импульсов и электро-магнитные акустические преобразователи, работающие в режиме регистрации [1, 2].

Оптико-акустическое преобразование наносекундного импульсного лазерного излучения в металлах приводит к возбуждению продольных, сдвиговых и поверхностных ультразвуковых импульсов. Эффективность возбуждения и спектр импульсов определяется теплофизическими свойствами материалов и параметрами лазерного излучения, такими как длительность импульса и размер пятна на поверхности образца. Для регистрации объёмных и поверхностных волн в работе предлагаются образцы в форме полудисков с радиусом 10 мм и толщиной 5 мм. Лазерное излучение фокусируется цилиндрической линзой вдоль осевой линии, образующей цилиндрическую поверхность образца. При такой геометрии оптико-акустического источника в образце возбуждаются объёмные и поверхностные упругие волны, распространяющиеся к периферии, при этом сдвиговые импульсы поляризованы в плоскости образца. Вдоль цилиндрической поверхности образца на двухсторонней печатной плате размещены 5 катушек электромагнитных акустических преобразователей, подключённых к широкополосным предварительным усилителям. Для компактности усилители были собраны на этой же печатной плате, изображение которой представлено на Рис. 1. В качестве катушек использованы промышленные индуктивности, изготовленные из медной проволоки и имеющие ферритовый сердечник. Резонансная частота катушек равна 26 МГц, а индуктивность составляет 10 мкГн. Линейные размеры катушек заключены в объём 2,8x2,8x2 мм³. На печатную плату катушки припаяли, положив на боковую поверхности. Таким образом, реализована схема многоэлементной регистрации, позволяющая одновременное измерение скорости различных ультразвуковых импульсов и проведение оценки упругих модулей. Простота изготовления и низкая себестоимость решения делают его перспективным для решения ряда задач неразрушающего контроля и диагностики металлов и композитов на металлической основе.

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 приблизительно 10 нс при частоте повторения 10 Гц. Сигналы ЭМА преобразователей регистрировались осциллографом UTB-TREND 722-200-7, компании UNI-T 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, где в результате абляции материала остаются незначительные отпечатки. В эксперименте излучение лазера фокусировалось в отрезок длиной ≈ 4 мм и шириной порядка 0.1 мм, позиционирование пятна вдоль оси полудиска выполнялось микрометрическим столиком. Радиус цилиндрической поверхности образцов равен 10 мм, а толщина – 5 мм.

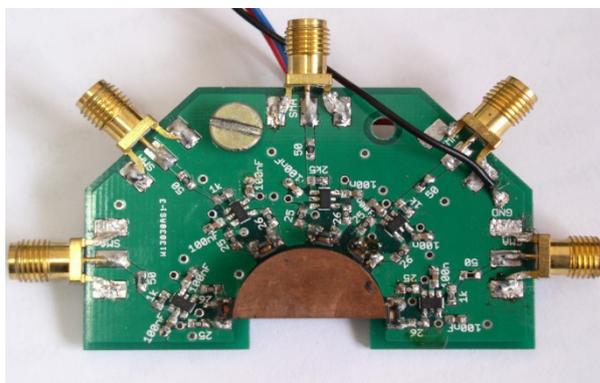


Рисунок 1 - Изображение многоэлементного регистрирующего устройства с образцом.

Механизм оптико-акустического преобразования в металлах подробно рассматривался в ряде работ, см. например [3]. В результате поглощения лазерного излучения в слое толщина которого составляет десятки нанометров, в материале возникают тепловые источники. За время действия лазерного импульса глубина диффузии тепла определяется из выражения $\sqrt{\tau\chi}$, где τ – длительность лазерного импульса, χ – температуропроводность металла. Оценки показывают, что даже в материалах с высокой температуропроводностью, глубина тепловой диффузии не превышает несколько микрометров, из чего можно сделать вывод, что изменение температуры за время действия лазерного импульса происходит в тонком приповерхностном слое, расширение которого создаёт упругие импульсы. Диаграмма направленности импульсов зависит от остроты фокусировки лазерного излучения и в случае острой фокусировки приближается к диаграмме направленности точечного источника. В данной работе фокусировали цилиндрической линзой, что уменьшает дифракционные потери для объёмных и поверхностных волн. Решение задачи о возбуждении ультразвуковых импульсов можно выполнить с применением метода передаточных функций, позволяющего разделить влияние свойств поглощающей среды от параметров лазерного импульса, таких как профиль огибающей интенсивности и длительность импульса. Важно отметить, что спектр возбуждаемых импульсов значительно шире регистрируемых ввиду рассеяния и поглощения ультразвука.

Пример сигнала, зарегистрированного в образце поликристаллической меди М1, представлен на Рис. 2. Полученное значение скорости звука продольного импульса составило $4,60 \pm 0,05$ км/с, что несколько меньше табличного значения 4,70 км/с, а

значение для сдвиговой волны составляет $2,20 \pm 0,05$ км/с, что близко к табличному значению 2,26 км/с [4]. Точность измерений оценивается не хуже, чем 2%.

Рисунок 2 - Оптико-акустические сигналы, зарегистрированные в поликристаллической меди М1. Литера «П» обозначает продольный импульс, а «С» – сдвиговой импульс.

В работе показана возможность уменьшения линейных размеров отдельного ЭМА преобразователя и реализация многоэлементного режима для образцов имеющих форму полудисков за счёт применения промышленных индуктивностей вместо плоских катушек, изготовленных вручную. Отметим, что полудисковая форма образцов выбрана для удобства проведения измерений скоростей объёмных и поверхностных ультразвуковых волн. Усилители сигналов, возбуждаемых в катушках, выполнены на двухсторонней печатной плате, с выводами в высокочастотные коаксиальные разъёмы. Решение поставленной задачи по измерению скорости и определению модулей сохраняет подход высокочастотной бесконтактной регистрации.

В заключении отметим, что предложенный подход многоэлементного измерения возбуждаемых лазером объёмных и поверхностных ультразвуковых импульсов имеет хорошие перспективы для применения в решении задач неразрушающего контроля и диагностики металлов и композитов на их основе.

Список литературы:

1. V. V. Kozhushko, V. P. Sergienko, Y. N. Mirchev, A. N. Alexiev, Characterisation of composites by laser ultrasound//Non-destructive Testing and Repair of Pipelines, Editors: E.N. Barkanov, A. Dumitrescu, I. A. Parinov. Springer, p. 209-225, (2018).
2. В.В. Кожушко, В.П. Сергиенко, В.Н. Мышковец / Определение модулей металлических композитов бесконтактной регистрацией оптико-акустических импульсов // Учен. зап. физ. фак-та Моск. Ун-та., Т. 5., С. 1751001-1-4, (2017).
3. I. M. Pelivanov, D. S. Kopylova, N. B. Podymova, and A. a. Karabutov, Optoacoustic method for determination of submicron metal coating properties: Theoretical consideration // J. Appl. Phys. 106, p. 1-8, (2009).
4. Физические величины: Справочник, под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, С. 1232, (1991).