

## Лазерная генерация и электромагнитная регистрация нормальных акустических волн в ферромагнитных металлах

© С.Ю. Гуревич, Ю.В. Петров

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),  
454080 Челябинск, Россия  
e-mail: sergur.u@mail.ru

(Поступило в Редакцию 15 апреля 2015 г. В окончательной редакции 7 мая 2015 г.)

Экспериментально исследованы процессы бесконтактной генерации и регистрации нормальных акустических волн в ферромагнитном листовом металлоизделии из сплава 32НҚД. Установлены основные зависимости между параметрами указанных процессов.

### Введение

Одним из важных технических применений акустики металлов является создание на ее базе акустических методов контроля качества композитных материалов и листовых металлоизделий, широко используемых в авиации ракетостроении. Поскольку оконечные части силовых установок, а также приборные отсеки соответствующих аппаратов изготавливаются, как правило, на основе листовых высокотемпературных ферромагнитных сплавов (типа 32НҚД), то имеет место проблема организации контроля качества указанных изделий с помощью нормальных акустических волн (волн Лэмба), параметры которых необходимо исследовать. При этом следует иметь в виду, что применение контактных жидкостей при контроле, как правило, не допускается, поэтому методы генерации и регистрации волн Лэмба должны быть бесконтактными.

В настоящей работе изложены результаты экспериментального исследования генерации волн Лэмба ультразвуковой частоты в металлической части изделия за счет оптико-акустического преобразования (термоупругий эффект) с использованием импульсного лазерного излучения и их регистрации на основе обратного электромагнитоакустического (ЭМА) преобразования с помощью широкополосных (по спектру) ЭМА-приемников. Для прогнозирования поведения параметров нормальных акустических волн при высоких температурах исследование проведено в интервале от комнатных температур до температуры магнитного фазового перехода, поскольку ранее было экспериментально обнаружено влияние температуры на возбуждение объемных ультразвуковых волн в ферромагнитных металлах под действием лазерных импульсов, особенно в районе магнитного фазового перехода (точка Кюри) [1].

### Лазерная генерация

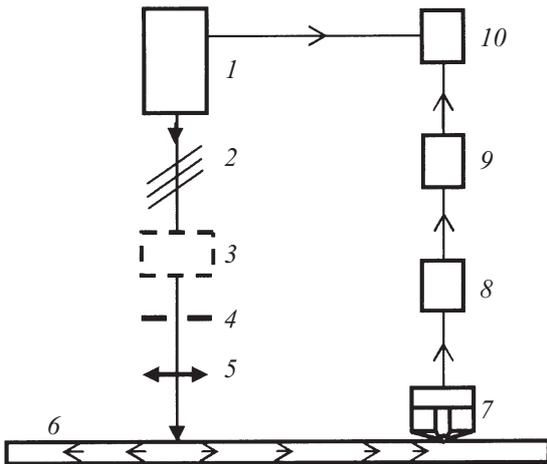
Экспериментальное исследование лазерной генерации проводилось с помощью стенда, схема которого показана на рис. 1. Он состоит из импульсного лазера 1, оптического аттенюатора 2, измерителя мощности лазерного

излучения 3, диафрагмы 4, фокусирующей линзы 5, исследуемых образцов в виде металлических пластин 6, ЭМА-приемника волн Лэмба 7, усилителя тока 8, усилителя напряжения 9, цифрового осциллографа 10.

Оптико-акустическое преобразование на поверхности образца осуществляется импульсным лазером Nd: YAG „Brilliant В“ фирмы QUANTEL (Франция) с модулируемой добротностью. Длина волны лазерного излучения 1064 nm, длительность и энергия световых импульсов равны соответственно 4–6 ns (по уровню 0.7) и 0.85 J. Средняя мощность лазера при частоте следования импульсов 10 Hz составляет 8.5 W. Диаметр светового пучка 9.5 mm, его расхождение менее чем 0.7 mrad. Для регулирования мощности лазерного излучения используется оптический аттенюатор в виде набора тонких плоскопараллельных стеклянных пластин, расположенных под небольшим углом к лучу лазера. Мощность лазерного излучения измеряется прибором ИМО-2Н. Изменение размеров лазерного пятна осуществляется с помощью диафрагм с круглым отверстием и собирающей линзы. Образцами служили пластины из инвара, полученные методом горячейковки и последующей мехобработки, размерами 270 × 60 mm и толщиной  $h$  от 0.6 до 2.5 mm.

Для регистрации возбуждаемых волн Лэмба использовались либо серийные пьезоприемники частотами 0.6 и 1.25 MHz, либо широкополосный (от 0.1 до 60 MHz) приемный тракт. Последний состоит из последовательно соединенных ЭМА-приемника, усилителей тока и напряжения и цифрового осциллографа GDS-2202. Оригинальной частью приемного тракта является широкополосный ЭМА-приемник, содержащий источник магнитного поля, высокочастотный индуктор и токовый усилитель.

Амплитуда, форма, длительность и частота колебаний электрических импульсов, наблюдаемых на экране дисплея осциллографа, считаются пропорциональными соответствующим величинам упругих импульсов. Пределы допускаемых значений относительной погрешности измеряемых величин не превышают  $\pm 3\%$ . Источником магнитного поля ЭМА-приемника (оно же внешнее поляризирующее поле) является постоянный магнит П-образной формы. Он собран из двух прямоугольных параллелепипедов, изготовленных из сплава неодим-



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда. Пояснения в тексте.

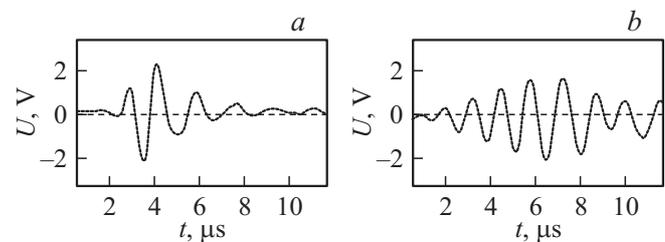
железо-бор. С одной стороны, разноименные полюса этих магнитов замыкаются ферромагнитной переключкой. На двух других полюсах располагаются концентраторы клиновидной формы. В зазор между концентраторами, где индукция магнитного поля максимальна, помещается высокочастотный индуктор в виде короткого прямолинейного проводника. Конструкция ЭМА-приемника обеспечивала наиболее оптимальный прием симметричных и антисимметричных ультразвуковых волн. Достигалось это необходимой ориентацией поляризующего магнитного поля относительно образца (за счет изменения формы концентраторов полюсов постоянного магнита) и расположения индуктора ЭМА-приемника. Индуктор подключается к входу усилителя тока, который выполнен на СВЧ-транзисторах, соединенных по схеме с общей базой. В этом случае при больших токах эмиттера входное сопротивление усилителя тока становится сравнимым с сопротивлением индуктора, что обеспечивает их хорошее согласование. Частота собственного резонанса индуктора составляет 60 МГц, поэтому усилитель тока обеспечивает достаточно широкую частотную полосу пропускания электромагнитных колебаний. С токового усилителя электромагнитные импульсы поступают на широкополосный усилитель напряжения, затем на вход цифрового осциллографа. Воздушный зазор между индуктором и поверхностью пластины составлял величину 1 мм. Таким образом, ЭМА-приемник регистрирует импульсы электромагнитного поля, наводимого ультразвуковыми импульсами, практически без искажений.

Визуализация и обработка наводимых электромагнитных импульсов осуществляется с помощью двухканального осциллографа GDS-2202, предназначенного для исследования и измерения параметров периодических и непериодических сигналов. Осциллограф обеспечивает в полосе частот от 0 до 200 МГц цифровое запоминание сигнала, измерение его амплитуды от 2 мВ до 300 В и временных интервалов от 1 нс до 10 с, автоматическое

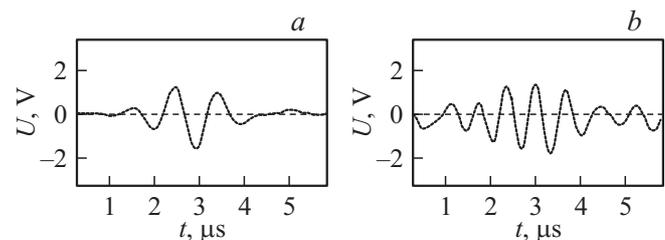
измерение амплитудно-временных параметров регистрируемого сигнала с выводом его формы и результатов измерения на экран дисплея, а также быстрое преобразование Фурье.

Принцип работы ЭМА-приемника заключается в следующем. Элементы объема поверхностного слоя металлического ферромагнетика под действием упругих волн изменяют свою форму и за счет линейного магнитоупругого эффекта создают над поверхностью образца переменное магнитное поле. Это поле наводит в высокочастотном индукторе эдс, пропорциональную упругим смещениям поверхности. Внешнее (поляризующее) постоянное магнитное поле увеличивает амплитуду наводимой эдс. Она будет максимальной, если силовые линии поляризующего поля направить параллельно поверхности образца, а индуктор расположить перпендикулярно им. Более подробно механизм трансформации упругих волн в электромагнитные изложен в работе [2].

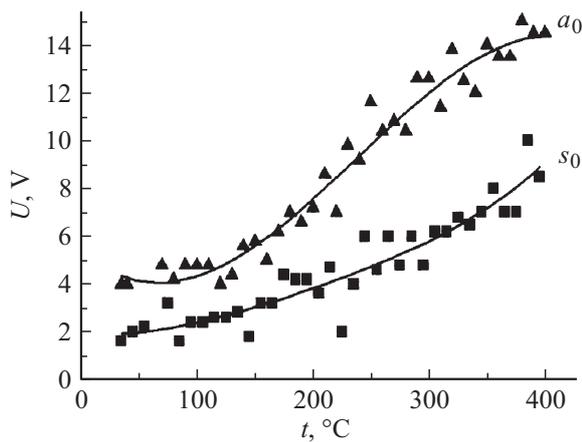
Некоторые результаты показаны на рис. 2, 3, из которых видно, что собственная частота колебаний пьезоприемника может не совпадать с квазичастотой  $\nu$  акустических импульсов волн Лэмба. Квазичастота импульса определялась как величина, обратная условной длительности импульса  $\tau$ . В свою очередь  $\tau$  определялась как сумма длительностей максимальных положительного и отрицательного пиков на временной зависимости формы импульса. Длительность импульсов и число колебаний в них для симметричных волн примерно в три раза меньше, чем для антисимметричных. Связано это, очевидно, с особенностями лазерной генерации волн Лэмба. С увеличением толщины пластины независимо от квазичастоты



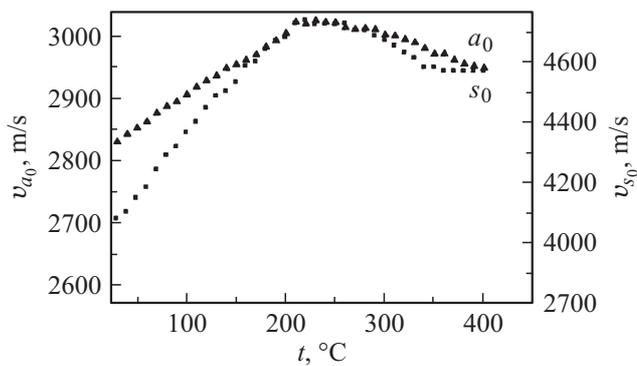
**Рис. 2.** Зарегистрированные пьезоприемником импульсы волн Лэмба в пластине  $h = 0.60$  мм. Частота пьезоприемника 0.60 МГц: *a* — симметричная мода  $s_0$ ,  $\nu = 0.64$  МГц; *b* — антисимметричная мода  $a_0$ ,  $\nu = 0.68$  МГц.



**Рис. 3.** Зарегистрированные пьезоприемником импульсы волн Лэмба в пластине  $h = 1.5$  мм. Частота пьезоприемника 1.25 МГц: *a* — симметричная мода  $s_0$ ,  $\nu = 0.93$  МГц; *b* — антисимметричная мода  $a_0$ ,  $\nu = 1.31$  МГц.



**Рис. 4.** Зависимость амплитуд импульсов симметричных ( $s_0$ ) и антисимметричных ( $a_0$ ) мод волн Лэмба от температуры,  $h = 0.60$  mm. Частота пьезоприемника 0.60 МГц,  $\blacktriangle$  — мода  $a_0$ ,  $\blacksquare$  — мода  $s_0$ .



**Рис. 5.** Зависимость средней групповой скорости симметричных ( $s_0$ ) и антисимметричных ( $a_0$ ) мод волн Лэмба от температуры,  $h = 1.5$  mm. Частота пьезоприемника 1.25 МГц,  $\blacktriangle$  — мода  $a_0$ ,  $\blacksquare$  — мода  $s_0$ .

ты колебаний амплитуда импульсов симметричных волн уменьшается, их длительность увеличивается. Для антисимметричных волн — наоборот. Кроме того, из рис. 2, 3 следует, что амплитуда и форма акустических импульсов, а также их длительность в полной мере могут быть использованы для контроля, например, толщины композитных материалов и листовых металлоизделий.

Для определения влияния магнитного фазового перехода на параметры импульсов волн Лэмба были проведены температурные исследования на пластине из ферромагнитного сплава инварного состава 32НҚД, точка Кюри которого равна  $210^\circ\text{C}$  (рис. 4). Из полученных результатов видно, что имеет место увеличение амплитудного значения импульсов примерно в семь раз. Существенных изменений формы импульсов, их длительности и квазичастоты колебаний при нагревании пластин не наблюдалось.

Известны способы оценки физико-механических свойств ферромагнитных металлоизделий, основанные

на измерении скоростей акустических волн различных видов. Для определения влияния температуры на скорость волн Лэмба было проведено соответствующее экспериментальное исследование, результаты которого представлены на рис. 5. Видно, что скорости симметричных и антисимметричных волн Лэмба в ферромагнитной пластине инварного состава с повышением температуры увеличиваются по линейному закону, достигают максимума в области точки Кюри и затем уменьшаются. Такое поведение температурной кривой аналогично температурной зависимости продольных волн, полученной ранее [3]. На рис. 5 видно, что увеличение скорости в диапазоне от комнатной температуры до  $250^\circ\text{C}$  составляет примерно 12%. Хорошо прослеживается точка перегиба, соответствующая магнитному фазовому переходу. Изменение толщины пластины и квазичастоты акустических импульсов на температурную зависимость скорости волн Лэмба существенного влияния не оказывают.

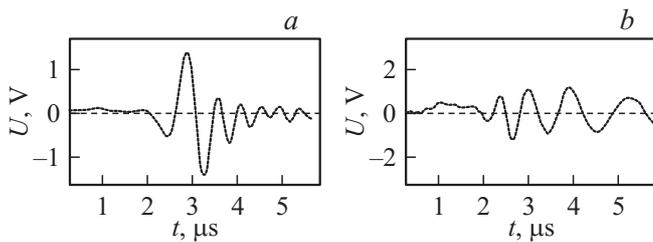
## Электромагнитная регистрация

Как уже отмечалось, контактные методы регистрации волн Лэмба не могут быть использованы для ультразвукового контроля указанных во введении материалов и металлоизделий. В связи с этим авторами настоящей работы была разработана методика и аппаратура для бесконтактной (электромагнитной) регистрации волн Лэмба. Эксперимент проводился на стенде, описанном в работе [4].

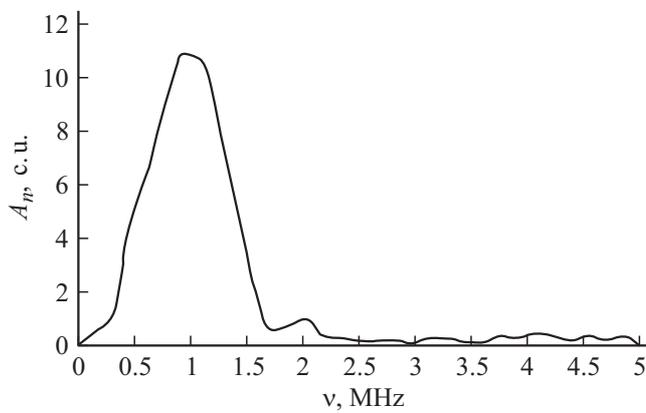
Учитывая, что проведенные исследования являются довольно объемными, в работе приводятся результаты, относящиеся только к одной пластине. При этом считается, что параметры электромагнитных импульсов, наблюдаемых на дисплее осциллографа, пропорциональны соответствующим параметрам ультразвуковых импульсов волн Лэмба.

На рис. 6 приведены осциллограммы электромагнитных импульсов, наводимых в ЭМА-приемнике волнами Лэмба, распространяющимися в пластине толщиной 0.6 mm. Тип и номер возбуждаемых в пластине ультразвуковых волн Лэмба определялись по методике, предложенной авторами в работе [5]. Из результатов экспериментов следует, что при лазерной генерации импульсов акустических волн в ферромагнитной металлической пластине широкополосный ЭМА-приемник регистрирует импульсы симметричных  $s_0$  и антисимметричных  $a_0$  ультразвуковых волн Лэмба нулевых номеров. Из сравнения максимальных амплитуд  $U$ , длительностей  $\tau$ , квазичастот колебаний  $\nu$  и форм этих импульсов видно, что форма импульсов различается, амплитуда импульса симметричных волн значительно больше, чем антисимметричных, разница в длительностях импульсов небольшая, а квазичастоты колебаний практически одинаковы. Наблюдаемые отличия связаны, очевидно, с особенностями лазерной генерации волн Лэмба.

Из сравнения рис. 2 и 6 следует, что регистрируемая ЭМА-приемником максимальная величина импульса мо-



**Рис. 6.** Электромагнитные импульсы, наведенные в ЭМА-приемнике волнами Лэмба, распространяющимися в ферромагнитной металлической пластине,  $h = 0.60$  мм,  $a$  — симметричная мода  $s_0$ ,  $\nu = 1.0$  МГц;  $b$  — антисимметричная мода  $a_0$ ,  $\nu = 1.1$  МГц.



**Рис. 7.** Спектр электромагнитного импульса, наведенного в ЭМА-приемнике модой  $s_0$  волны Лэмба,  $a_n$  — нормированная амплитуда в условных единицах.

ды  $a_0$  в 4 раза меньше, чем аналогичная для пьезоприемника, и в 1.4 раза меньше для моды  $s_0$ . Также уменьшение сигнала связано с наличием воздушного зазора между ЭМА-приемником и поверхностью пластины, в котором происходит затухание электромагнитного поля. Что касается квазичастоты импульса, то ЭМА-приемник регистрирует для моды  $a_0$  квазичастоту в 2.2 раза большую, чем для пьезоприемника, и в 1.6 раза большую для моды  $s_0$ . Эти отклонения связаны с конструкцией индуктора ЭМА-приемника.

Для оценки ширины частотного спектра возбуждаемых лазером ультразвуковых импульсов с помощью фурье-преобразования был рассчитан спектр импульса симметричной моды  $s_0$ . (рис. 7). Видно, что вся энергия ультразвукового импульса, длительность которого равна  $2.9 \mu\text{s}$ , практически заключена в пределах от 0 до 1.75 МГц с максимумом амплитуды на частоте  $\sim 1.0$  МГц. В то же время у оптического импульса, длительность которого по уровню 0.7 составляет  $\sim 5$  нс, верхний предел частотного диапазона ограничивается  $\sim 100$  МГц. Такое уменьшение частоты означает, что кованный металл хорошо пропускает низкочастотную часть спектра ультразвукового импульса (до 2.5 МГц)

и интенсивно поглощает его высокочастотную (больше 2.5 МГц) часть.

Из анализа полученного спектра следует, что, когда необходимо получить максимальную амплитуду наведенного электромагнитного импульса, например, для реализации теневого или эхо-методов контроля [6], целесообразнее использовать резонансный ЭМА-приемник. Его индуктор выполняется в виде эквидистантной решетки с шагом, равным половине длины волны. На частоту спектра, соответствующую максимальной амплитуде, индуктор настраивается подбором числа витков. Резонансный ЭМА-приемник может подключаться непосредственно к входу усилителя стандартного дефектоскопа.

## Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований установлены параметры импульсов акустических нормальных волн Лэмба ультразвуковой частоты в ферромагнитных металлах (на примере инварного сплава 32НҚД), возбуждаемых импульсным лазерным излучением в интервале температур от комнатной до температуры магнитного фазового перехода (точка Кюри,  $207^\circ\text{C}$  для сплава 32НҚД). Экспериментальные исследования процесса электромагнитной регистрации указанных импульсов показали, что при разработке оптимальных конструктивов ЭМА-приемников следует учитывать, что кованный металл интенсивно поглощает высокочастотную (более 2.5 МГц) часть спектра импульса волн Лэмба. Соответственно индуктор ЭМА-приемника должен быть резонансным. Результаты исследования могут быть использованы при создании бесконтактных акустических методов и средств контроля качества листовых металлоизделий и композитных материалов на их основе.

Авторы выражают признательность А.А. Шульгинову за помощь в работе.

## Список литературы

- [1] Буденков Г.А., Гуревич С.Ю., Каунов А.Д., Маскаев А.Ф. // Акуст. журн. 1983. Т. 29. № 4. С. 561–562.
- [2] Комаров В.А., Мужижский В.Ф., Гуревич С.Ю. Теория физических полей. Т. III. Связанные поля. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. 627 с.
- [3] Гуревич С.Ю., Гальцев Ю.Г., Каунов А.Д., Карипов Р.С. // Дефектоскопия. 1987. № 2. С. 47–52.
- [4] Гуревич С.Ю., Петров Ю.В., Голубев Е.В., Шульгинов А.А. // Вестник ЮУрГУ. Серия „Математика. Механика. Физика“. 2012. Вып. 7. № 34. С. 146–149.
- [5] Петров Ю.В., Гуревич С.Ю., Голубев Е.В. // Дефектоскопия. 2010. № 3. С. 45–49.
- [6] Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник в 2 кн. / Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. Кн. 2. 352 с.