

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ ПРОДОЛЬНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ В ФЕРРОМАГНИТНОМ МЕТАЛЛЕ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРОМ**

*Ю.В. Петров, С.Ю. Гуревич*

Изложены результаты экспериментального определения характеристик направленности импульсного оптоакустического (лазерного) излучателя ультразвуковых волн. Описаны экспериментальный стенд и методика измерений. Проведено сравнение с пьезоэлектрическим и электромагнитоакустическим излучателем.

Ключевые слова: лазерный излучатель, ферромагнитный металл, продольные ультразвуковые волны, характеристики направленности.

Впервые процесс импульсной лазерной генерации ультразвуковых волн в металле с учетом его ферромагнитных свойств был изучен авторами работы [1]. В дальнейшем результаты этой и последующих работ рассматривались как основа для создания методов и средств неразрушающего акустического контроля ферромагнитных металлоизделий при высоких температурах и с грубообработанной поверхностью. В частности, были определены характеристики направленности импульсного лазерного излучателя продольных ультразвуковых волн при термоупругом механизме оптоакустического преобразования [2]. Резервом повышения эффективности акустического контроля металлоизделий является увеличение мощности лазерного излучения; при этом, однако, следует учитывать переход термоупругого

механизма генерации ультразвуковых импульсов в испарительный механизм (абляция), который сопровождается выносом атомов металла с его поверхности. На результаты выявления внутренних дефектов металлоизделий указанная смена механизма не повлияет, тем более, если акустическому контролю подвергаются изделия с грубообработанной поверхностью (после горячих проката,ковки,штамповки и пр.). В то же время осуществление неразрушающего контроля качества металлоизделий на ранних стадиях передела металла является эффективным, так как позволяет в результате выбраковки избежать затрат на последующие технологические операции.

Для создания методов и средств акустического контроля указанных металлоизделий необходимо знать характеристики направленности излучателей ультразвуковых волн, в рассматриваемом случае импульсных лазерных излучателей. Решение поставленной задачи производилось экспериментально.

Для проведения экспериментальных исследований использовали установку, схему которой показана на рис. 1.

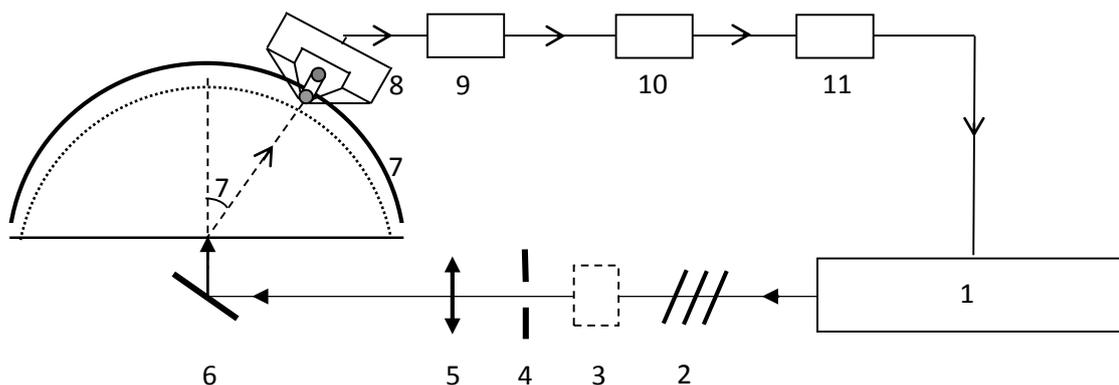


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – лазер, 2 – оптический аттенюатор, 3 – измеритель мощности лазерного излучения, 4– диафрагма, 5 – оптическая линза,
- 6 – поворотное зеркало, 7 – металлический полудиск, 8 – ЭМА приемник, 9 – усилитель тока, 10 – усилитель напряжения, 11 – цифровой осциллограф, – угол наблюдения

Нагрев поверхности металла осуществляется импульсным лазером 1 Nd: YAG Brilliant-B фирмы QUANTEL с модулированной добротностью. Длина волны лазерного излучения – 1064 нм, длительность и энергия световых импульсов 4–6 нс и 0,85 Дж соответственно. Средняя мощность лазера при частоте следования импульсов 10 Гц составляет 8,5 Вт. Диаметр светового пучка – 9,5 мм, его расхождение – менее чем 0,7 мрад. Для регулирования и измерения мощности лазерного излучения использовали оптиче-

ский аттенюатор 2 и прибор ИМО-2Н 3. Размеры лазерного пятна устанавливали с помощью набора круглых диафрагм 4 и собирающей линзы 5. Направление лазерного луча устанавливали с помощью зеркала 6. Диаметр лазерного пятна принимал значения 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,5 мм.

Поверхностная плотность тепловой мощности изменялась в пределах от  $q = 79 \text{ МВт/см}^2$  до  $q = 1783 \text{ МВт/см}^2$ , что позволило реализовать испарительный механизм генерации.

В качестве образца, в котором возбуждаются ультразвуковые волны, использовали полудиск 7, изготовленный из мелкозернистого сплава инварного состава. Его диаметр и толщина равны соответственно 220 и 60 мм. На боковой поверхности полудиска нанесены полярные координаты для определения характеристики направленности лазерного излучателя в интервале от  $0^\circ$  до  $80^\circ$ .

Для регистрации возбуждаемых ультразвуковых волн использовали широкополосный (от 0 до 200 МГц) приемный тракт. Он состоит из последовательно соединенных электромагнитоакустического приемника (ЭМАП) 8, усилителей тока 9, напряжения 10 и цифрового осциллографа 11 модели GDS-2202. Конструкция ЭМАП обеспечивала наиболее оптимальный прием как продольных, так и поперечных ультразвуковых волн [3]. В осциллографе осуществляли цифровое запоминание импульсов, автоматическую установку их изображений, автоматическое измерение амплитудно-временных параметров, быстрое преобразование Фурье с выводом результатов на экран дисплея. Считается, что измеряемые на экране амплитуда, длительность, форма импульсов и их спектры, пропорциональны соответствующим величинам ультразвуковых импульсов. Методика исследования изложена, в основном, в работе [4].

Некоторые результаты определения параметров акустических импульсов представлены на рис. 2, 3.

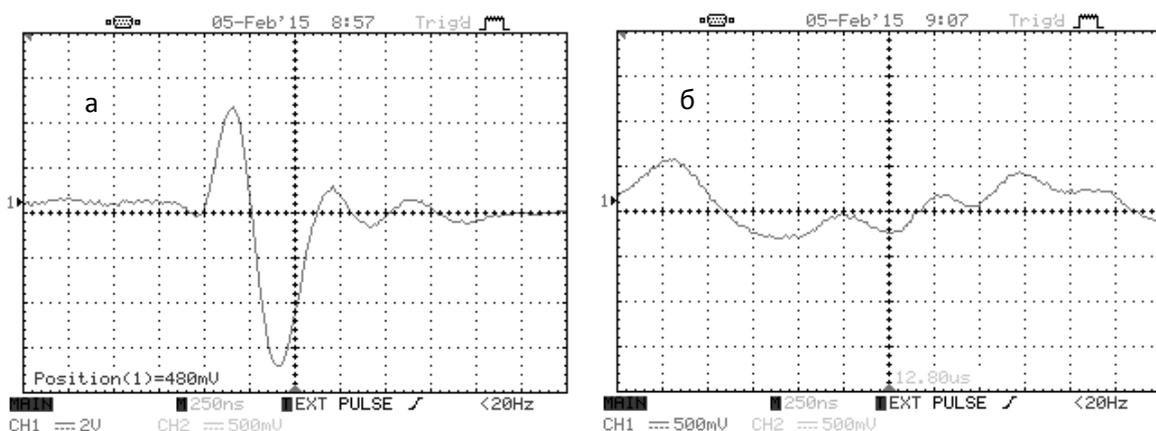


Рис. 2. Электромагнитные импульсы, зарегистрированные ЭМАП.  
Диаметр лазерного пятна 9,5 мм. Угол наблюдения: а –  $0^\circ$ ; б –  $80^\circ$ .  
Продольные волны

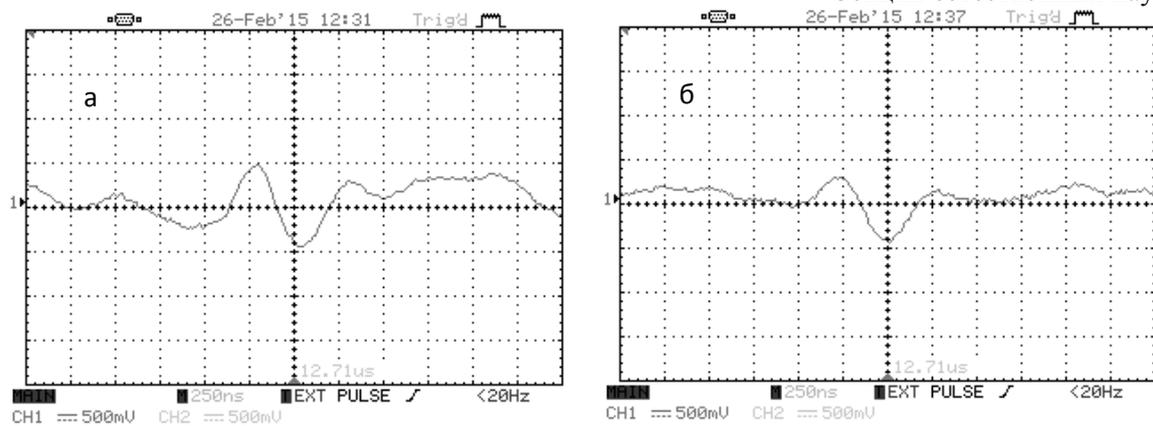


Рис. 3. Электромагнитные импульсы, зарегистрированные ЭМАП.  
Диаметр лазерного пятна 2,0 мм. Угол наблюдения: а –  $0^\circ$ ; б –  $75^\circ$ .  
Продольные волны

Из сравнения представленных на рис. 2, 3 результатов следует, во-первых, что увеличение диаметра лазерного пятна приводит к увеличению амплитуды импульса почти в 3,5 раза и к сокращению условной длительности импульса с 2,3 мкс до 1,7 мкс. Условная длительность импульса определялась как сумма длительностей максимальных положительного и отрицательного пиков на временной зависимости формы импульса. Во-вторых, изменение угла наблюдения приводит к перераспределению акустической энергии между составляющими импульса: с увеличением угла наблюдения амплитуда центрального импульса уменьшается, соответственно амплитуда «боковых» составляющих формы импульса увеличивается. Таким образом, с точки зрения повышения чувствительности бесконтактных акустических методов контроля использование лазерного излучателя с увеличенным до 9...9,5 мм диаметром лазерного пятна является более эффективным, так как затухание импульса вследствие его распространения в металлоизделии в меньшей степени сказывается на импульсе большей амплитуды.

На рис. 4 представлены некоторые результаты экспериментального определения характеристик направленности лазерного излучателя для двух частных случаев.

Прежде всего, обращает на себя внимание отсутствие боковых «лепестков» характеристик направленности. По сравнению с аналогичными характеристиками пьезоэлектрических и электромагнитоакустических излучателей это является преимуществом, так как вся акустическая энергия сосредоточена в пределах центрального «лепестка». Кроме того, отчетливо проявляется более эффективное распределение акустической энергии с большим лазерным пятном. Если сравнивать ширину «лепестков» по уровню 0,7, то для лазерного пятна диаметром 9,5 мм она составляет 26 градусов, а для пятна диаметром 2 мм – 70 градусов. Промежуточные значения ширины «центрального «лепестка» в зависимости от площади лазерного пятна при неизменности мощности лазерного излучения, равной 7,5 Вт, представлены

на рис. 5. Видно, что ширина «лепестка» монотонно уменьшается по зависимости, напоминающей экспоненциальную. Противоположный характер носит зависимость максимального значения акустического сигнала, соответствующего центральному «лепестку» от площади лазерного пятна (рис. 6). Здесь максимальное значение сигнала монотонно возрастает с увеличением площади; при этом зависимость также напоминает экспоненциальную.

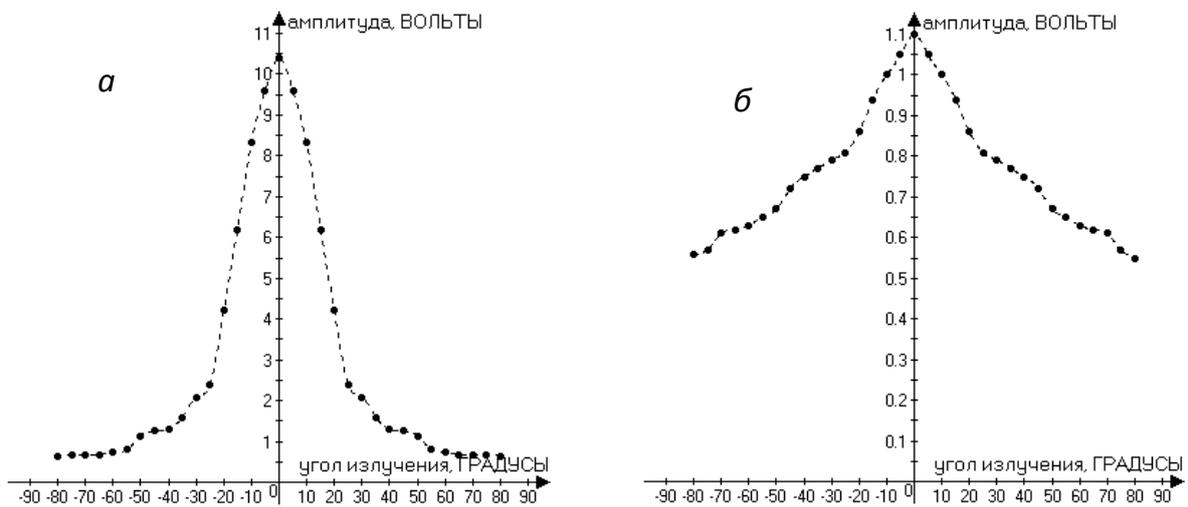


Рис. 4. Характеристики направленности лазерного излучателя импульсов продольных волн ультразвуковой квазичастоты.  
Диаметр лазерного пятна: *a* – 9,5 мм; *б* – 2,0 мм

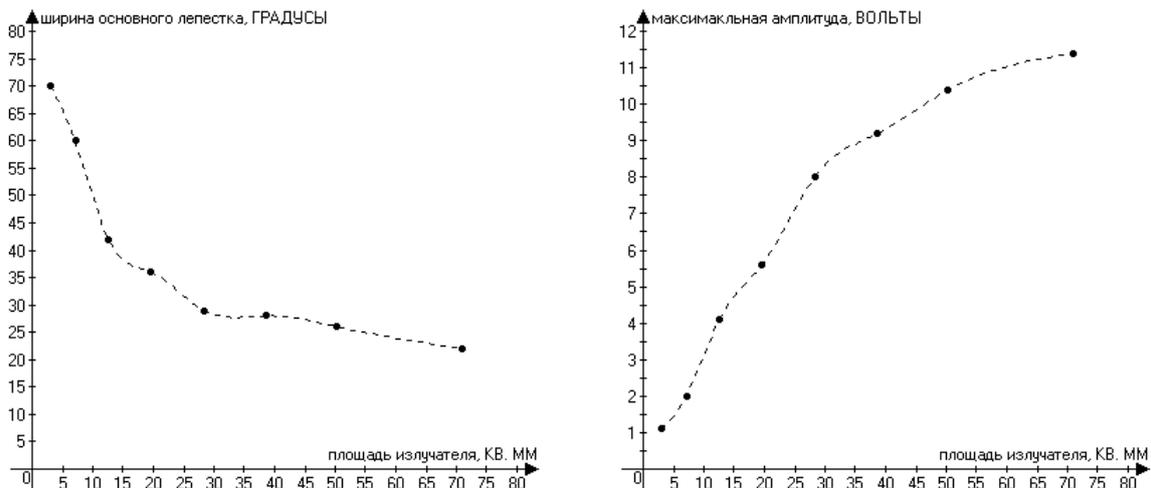


Рис. 5. Зависимость ширины центрального «лепестка» от площади лазерного пятна

Рис. 6. Зависимость максимального значения акустического сигнала от площади лазерного пятна

Если при акустическом неразрушающем контроле качества ферромагнитных металлоизделий планируется использовать так называемый спектральный метод [5], то для его реализации необходимо знать спектральный состав акустического импульса. С этой целью было проведено соответствующее экспериментальное исследование, один из результатов которого представлен на рис. 7. Здесь изображены форма акустического импульса (вверху рисунка), и его спектр (внизу рисунка). Как видно, максимальное количество акустической энергии соответствует частоте 1,6 МГц. Кроме того, имеют место быть и другие частоты, на которые также приходится акустическая энергия, но её доля в данном случае весьма незначительна. Отметим, что спектральный анализ проводился методом быстрого преобразования Фурье, который является одним из опций осциллографа GDS-2202.

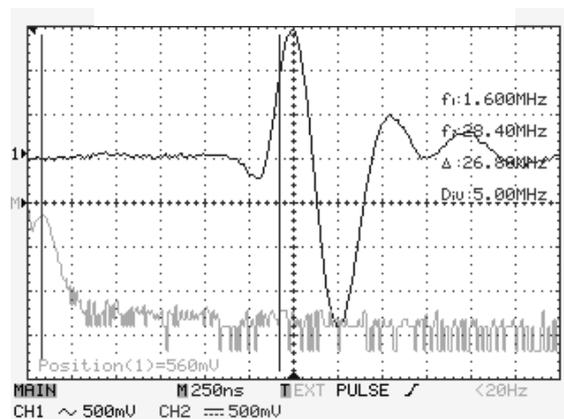


Рис. 7. Спектр акустического импульса, зарегистрированного ЭМАП. Диаметр лазерного пятна 9,5 мм. Угол = 0°. Продольные волны

Таким образом, из результатов проведенного экспериментального исследования следует, что для повышения чувствительности и разрешающей способности [6] средств акустического контроля ферромагнитных металлоизделий, использующих импульсное лазерное излучение, эффективнее использовать импульсный лазер, дающий пятно на поверхности изделия диаметром 8–9 мм при поверхностной плотности тепловой мощности, равной 79 МВт/см<sup>2</sup>.

#### Библиографический список

1. Возбуждение ультразвука в железе при фазовом переходе под действием лазерных импульсов / Г.А. Буденков, С.Ю. Гуревич, А.Д. Каунов, А.Ф. Маскаев // Акустич. журнал. – 1983. – Т. 29, № 4. – С. 561–562.
2. Гуревич, С.Ю. Стенд для определения характеристик направленности бесконтактных излучателей ультразвука / С.Ю. Гуревич, Ю.Г. Гальцев // Дефектоскопия. – 1991. – № 12. – С. 23–27.

3. Гуревич, С.Ю. ЭМА регистрация ультразвуковых волн Лэмба, возбуждаемых лазерными нанопульсами / С.Ю. Гуревич, В.Ю. Петров, Е.В. Голубев, А.А. Шульгинов // Дефектоскопия. – 2013. – № 8. – С. 3–8.

4. Петров, Ю.В. Экспериментальные определения параметров волн Лэмба и их лазерной генерации / Ю.В. Петров, С.Ю. Гуревич, Е.В. Голубев // Дефектоскопия. – 2010. – № 3. – С. 45–49.

5. Харкевич, А.А. Спектры и анализ / А.А. Харкевич. – М.: Физматлит., 1962. – 236 с.

6. Ермолов, И.Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества / И.Н. Ермолов, Ю.Я. Останин. – М.: Высш. шк., 1988. – 368 с.