

## УЛУЧШЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ СЕНСОРОВ

И. В. БОГАЧЕВ, Л. В. МЕЛЕЩЕНКО

Институт технической теплофизики НАН Украины. 03057, г. Киев-57, ул. Желябова, 2а. E-mail: biv\_vdoc@ukr.net

Рассмотрены различные конструкции ультразвуковых преобразователей, использующих магнитострикционный эффект и имеющих малую площадь излучающей поверхности (диаметр волновода  $0,3 \dots 1,0$  мм), что позволяет создать в контролируемом образце полусферическую (ненаправленную) продольную волну при зондирующем радиоимпульсном сигнале. Приведена схема стенда, с помощью которого можно определить основные характеристики и параметры составляющих элементов магнитострикционных сенсоров. Проанализировано влияние различных факторов и параметров на чувствительность и мощность излучения преобразователей. Высокая чувствительность сенсоров достигается также за счет использования специальных материалов с высокими значениями коэффициента магнитострикции и магнитострикции насыщения, которые подвергаются определенной технологической обработке. Рассмотрены способы обеспечения акустического контакта между сенсорами и объектами контроля. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* диаграмма направленности, акустический контакт, малоапертурные магнитострикционные сенсоры

Практический интерес представляет создание систем неразрушающего контроля высоконагруженных объектов сложной формы, таких, например, как лопатки турбин, лонжероны лопастей летательных аппаратов, тонкостенные элементы несущих конструкций и многое другое. Важным объектом контроля является сам ультразвуковой преобразователь диагностических систем. В подавляющем большинстве случаев это пьезоэлектрические преобразователи. Практически все методы измерения характеристик таких преобразователей, используемые в настоящее время, предполагают проведение интегральных (усредненных) по площади измерений параметров с использованием стандартных образцов и в дальней зоне акустического поля преобразователя. Однако для более точного измерения характеристик преобразователей, для обнаружения локальных дефектов, возникающих при их изготовлении, необходимо проводить дифференциальные измерения контролируемых параметров по поверхности преобразователя, что дает возможность определить причины отклонения параметров от номинальных значений и усовершенствовать технологические процессы изготовления преобразователей.

Для систем неразрушающего контроля вышеперечисленных объектов нужны малоапертурные ультразвуковые преобразователи, площадь рабочей поверхности которых гораздо меньше, чем у контролируемых образцов.

Магнитострикционные преобразователи, которые излучают продольные, поперечные, торсионные волны, широко используются в системах неразрушающего контроля [1, 2]. В подавляющем

большинстве они имеют значительные размеры излучающей поверхности.

Для решения вышеперечисленных задач авторами разработаны ультразвуковые преобразователи (рис. 1), использующие магнитострикционный эффект и имеющие малую площадь излучающей поверхности  $0,07 \dots 0,8$  мм<sup>2</sup> (диаметр волновода  $0,3 \dots 1,0$  мм), что позволяет создать в контролируемом образце полусферическую (ненаправленную) продольную волну при зондирующем радиоимпульсном сигнале с частотой заполнения  $0,5 \dots 2,5$  МГц [3]. На рисунке обозначено: 1 – корпус; 2 – ультразвуковое зеркало; 3 – волновод из магнитострикционного материала; 4 – катушка возбуждения; 5 – постоянный магнит; 6 – демпфер; 7 – разъем.

Основные параметры и характеристики магнитострикционных сенсоров (МСС) существенно зависят от конструкции самого сенсора, от точности изготовления его элементов и частей и от технологических процессов подготовки материалов, из которых изготавливается сенсор.

Для малоапертурных сенсоров одной из самых важных задач является обеспечение максимальной чувствительности [4]. Определению оптимальных параметров и характеристик преоб-

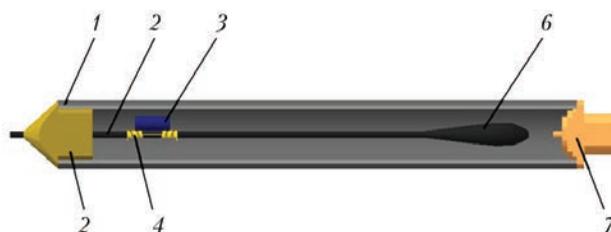


Рис. 1. Ультразвуковой малоапертурный МСС (обозначения см. в тексте)

разователей для решения поставленной задачи посвящена данная работа.

На рис. 2 изображена схема стенда, с помощью которого определялись основные характеристики и параметры составляющих элементов МСС.

На одном волноводе расположены два МСС: один излучающий, а второй – принимающий. При подаче импульса тока возбуждения в катушку излучателя на участке волновода под этой катушкой вследствие эффекта Джоуля возбуждается продольная ультразвуковая волна, распространяющаяся в обе стороны по волноводу. Волна, распространяющаяся влево, отражается от левого торца волновода и снова по волноводу распространяется вправо. Волна, распространяющаяся вправо, вследствие эффекта Виллари, наводит ЭДС в катушке приемника через время  $t_p$ , пропорциональное  $l_0$ . Распространяясь далее, волна отражается от правого торца волновода и начинает двигаться в обратном направлении. Расстояния между излучателем, приемником и торцами волновода выбраны следующим образом:  $l_1 \leq l_2$ . Тогда первый пришедший на принимающий МСС радиоимпульс прошел расстояние  $l_0$ , второй –  $l_1 + l_0$ , третий –  $l_2 + l_0$  и так далее. Торцы волновода зашлифованы для получения хороших отражающих свойств.

На рис. 3 изображена осциллограмма сигнала на катушке приемника.

Первый эксперимент был проведен с разными видами катушек в принимающем МСС: катушка № 1 – двухсекционная, аналогичная катушке излучателя; катушка № 2 – 4-х секционная; катушка № 3 – односекционная, катушка № 4 – односекци-

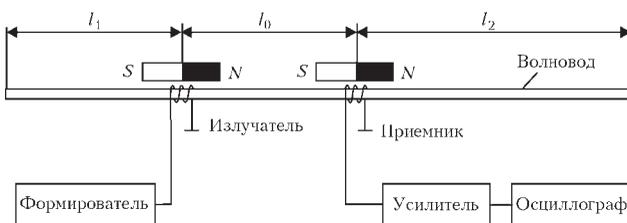


Рис. 2. Схема стенда для определения основных характеристик и параметров МСС

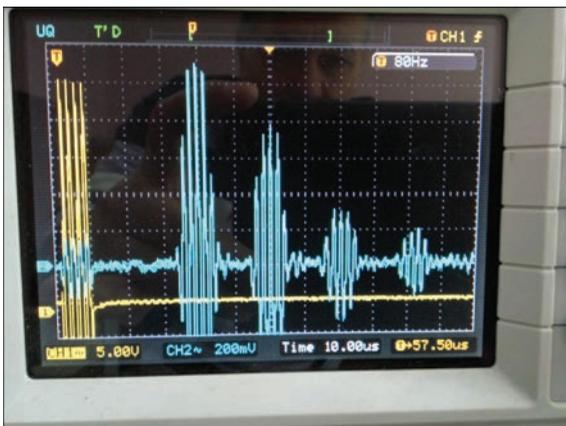


Рис. 3. Осциллограмма сигнала на выходе принимающего МСС

онная двухслойная, катушка № 5 – односекционная. Первые четыре катушки намотаны непосредственно на волновод, а пятая катушка намотана на изолирующий слой из фторопластовой пленки толщиной 0,15 мм. Каждая секция катушек содержит 20 витков обмоточного медного провода диаметром 0,10 мм. Катушка № 4 содержит два слоя по 20 витков. Смежные секции в катушках намотаны в противоположных направлениях. Излучающий преобразователь во всех экспериментах содержит двухсекционную однослойную катушку.

Очень важно понять, как влияет форма катушки на величину сигнала приемника, какова эффективность второго слоя, а также как влияет дополнительный изолирующий слой между волноводом и обмоткой на величину принятого сигнала.

В таблице приведены значения амплитуд соответствующих принятых радиоимпульсов для цилиндрического волновода диаметром 1 мм, где  $U_1$  – амплитудное значение напряжения на катушке излучателя;  $U_{21}$  – амплитудное значение напряжения первого принятого импульса на катушке приемника;  $U_{22}$  – амплитудное значение напряжения второго принятого импульса на катушке приемника;  $U_{21}/U_1$  – коэффициент двойного преобразования;  $Z_k$  – модуль электрического импеданса катушки.

Проведенные эксперименты показали, что амплитуда принятого сигнала практически пропорциональна количеству секций в катушке. При этом за счет намотки смежных секций в противоположных направлениях электрический импеданс изменяется не пропорционально квадрату общего числа витков, а пропорционально первой степени их количества за счет влияния взаимной индуктивной связи между секциями.

Из полученных результатов видно, что увеличение расстояния между волноводом и катушкой на 0,15 мм приводит к уменьшению амплитуды принятого сигнала в два раза. Следовательно, витки необходимо располагать как можно ближе к волноводу.

Для двухслойной катушки № 4 видно, что напряжение принятого импульса увеличилось в 1,6 раза, а электрический импеданс – в четыре. Так как энергия принятого импульса пропорциональна квадрату напряжения и обратно пропорциональна электрическому импедансу, то можно сделать вывод, что эффективность такой катушки значительно уменьшилась за счет удаления второго слоя обмотки от волновода на величину первого слоя.

Значения величин  $U_{22}$  необходимы для определения величины затухания ультразвукового сигнала в волноводе. Уменьшение сигнала происходит за счет дополнительного двукратного прохождения участка волновода  $l_1$ .

Измерив время задержки между первым и вторым принятыми импульсами, можно определить

Результаты измерений амплитуд сигналов на катушках магнитострикционных сенсоров

Катушка приемника	$U_{11}$ , В	$U_{21}$ , мВ	$U_{22}$ , мВ	$U_{21}/U_{11}$	$Z_k$ , Ом
№ 1	6	40	35	0,0067	12
№ 2	6	80	70	0,0133	24
№ 3	6	20	17	0,0033	6
№ 4	6	32	27	0,0053	24
№ 5	6	10	09	0,0017	6

скорость распространения продольной ультразвуковой волны в волноводе.

При этом скорость и затухание продольной ультразвуковой волны в волноводе можно определить из следующих выражений:

$$c_l = \frac{l_0}{\tau_{12}}; \beta = \frac{20 \lg U_{21} / U_{11}}{l_0},$$

где  $\tau_{12}$  – время задержки между излученным и первым принятым импульсами;  $c_l$  – скорость распространения продольной ультразвуковой волны в волноводе.

Зависимость акустического давления от времени в любой точке волновода описывается следующим выражением:

$$P(t, x) = u_1(t+x/c_l) K e^{-\beta x},$$

где  $u_1$  – напряжение на катушке излучателя;  $K$  – коэффициент электромеханической связи;  $\beta$  – коэффициент затухания ультразвукового сигнала в волноводе;  $x$  – расстояние от катушки излучателя до произвольной точки на волноводе.

Второй эксперимент был проведен с целью определения материалов и состава акустического зеркала, которое должно надежно крепить волновод к корпусу и при этом иметь акустический импеданс, значительно отличающийся от импеданса волновода. Для этого были залиты различными смесями тестовые кольцеобразные образцы (см. рис. 4):

образец № 1 (две шт.) – эпоксидная смола ЭД-20, наполненная вспученным перлитом (два верхних кольца);

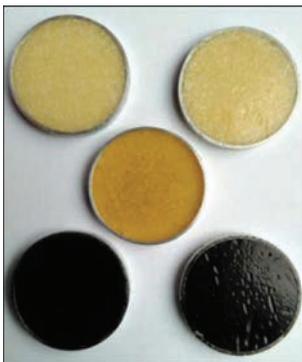


Рис. 4. Тестовые кольца для проверки материала акустического зеркала

образец № 2 (одна шт.) – чистая эпоксидная смола ЭД-20 (среднее кольцо);

образец № 3 (две шт.) – эпоксидная смола ЭД-20, наполненная сажей (два нижних кольца).

Наполнители добавлялись в максимальном количестве, при котором компанды еще сохранял текучесть.

Ультразвуковой сигнал пропускаться через полученные образцы. Для излучения и приема сигналов использовались МСС, изготовленные согласно рис. 1, залитые чистой эпоксидной смолой ЭД-20 с односекционными однослойными катушками.

Исследования показали, что наибольшее ослабление сигнала было получено у образцов № 1. Образцы № 2 и № 3 имели практически одинаковый коэффициент затухания ультразвукового сигнала.

Согласно полученным экспериментальным данным были изготовлены высокочувствительные МСС, фотографии внутреннего модуля и внешнего вида которых приведены на рис. 5.

Высокая чувствительность сенсоров достигается также за счет использования специальных материалов с высоким значением коэффициента магнитострикции и магнитострикции насыщения, которые подвергаются определенной технологической обработке [4].

Принимающий конец волновода сенсора может быть зашлифован заподлицо, а может выступать на несколько миллиметров из корпуса. В первом случае для обеспечения акустического контакта необходимо использовать контактную жидкость. Во втором случае можно обойтись без нее, что очень удобно при контроле объектов с необработанной поверхностью.

Значительно сократить время контроля можно, используя линейку или матрицу малоапертурных МСС, размещенных в одном корпусе [5]. Увеличение количества измерительных каналов не является сложной технической проблемой при современном уровне интеграции электронных устройств.

Электрический импеданс малоапертурных магнитострикционных сенсоров составляет 0,1...50,0 Ом. Изготовление пассивных согласующих устройств в одном корпусе с сенсором позволяет уменьшить потери сигнала при передаче его к электронным блокам. Особенно это эффективно для сенсоров с маловитковыми катушками.

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что наилучшие параметры и характеристики преобразователей достигаются при использовании однослойных маловитковых катушек возбуждения. Для обеспечения высокой мощности излучения возбуждающих преобразователей и повышения чувствительности принимающих сенсоров используются многосекционные катушки, которые позволяют получить эффект акустического суммирования сигналов в волноводе.

Применение ультразвуковых концентраторов при проектировании малоапертурных сенсоров позволяет в несколько раз повысить эффективность последних.

Волновод преобразователей имеет акустический импеданс, близкий к импедансу контролируру-

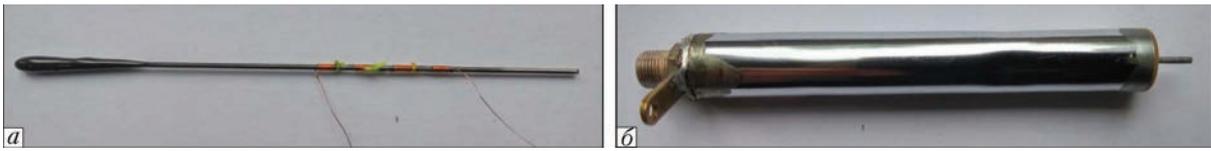


Рис. 5. Малоапертурные магнитострикционные сенсоры: а – волновод с катушкой и демпфером; б – внешний вид

емого объекта, что удобно для акустического согласования сенсора и объекта контроля.

Еще одно существенное преимущество МСС – точка Кюри (температура, при которой исчезает магнитострикционный эффект) для большинства распространённых магнитострикционных материалов находится в пределах 600...1200 °С, что значительно превышает температуру Кюри для пьезоэлектрических преобразователей. Эта особенность позволяет использовать малоапертурные МСС при высоких температурах, что необходимо для контроля нагретых тел (котлов, труб, теплообменников и так далее) непосредственно в процессе их функционирования.

Применение в системах ультразвукового контроля малоапертурных магнитострикционных сенсоров позволило также с высокой достоверностью контролировать распределение акустического давления по поверхности элементов ультразвуковых фазированных антенных решеток, а также другие параметры и характеристики современных ультразвуковых сенсоров.

#### Список литературы

1. Seung H. M., Kim Y. Y. (2016) Generation of omni-directional shear-horizontal waves in a ferromagnetic plate by a magnetostrictive patch transducer. *NDT & E International*, **80**, 6–14.
2. Kwun H., Teller C. M. (1994) Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional and flexural waves in a steel rod. *Journal of the Acoustical Society of America*, **96**, 1202–1204.
3. Бабак В. П., Богачев І. В. (2014) *Ультразвуковий малоапертурний магнітострикційний перетворювач*. Україна Пат. 104567, заявник і власник патенту ІТТФ НАНУ.
4. Бабак В. П., Бабак С. В., Берегун В. С. та ін. (2015) *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики*. Бабак В. П. (ред.), Київ.
5. Бабак В. П., Богачев І. В. (2015) *Матриця малоапертурних магнітострикційних перетворювачів*. Україна, Пат. 107629; заявник і власник патенту ІТТФ НАНУ.

#### References

1. Seung, H.M., Kim, Y.Y. (2016) Generation of omni-directional shear-horizontal waves in a ferromagnetic plate by a magnetostrictive patch transducer. *NDT & E Intern.*, **80**, 6-14.
2. Kwun, H., Teller, C.M. (1994) Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional and flexural waves in a steel rod. *J. of the Acoustic Society of America*, **96**, 1202-1204.
3. Babak, V.P., Bogachev, I.V. (2014) *Ultraviolet small aperture magnetostrictive transducer*. Pat. 104567 Ukraine, ITTF NASU [in Ukrainian].
4. Babak, V.P., Babak, S.V., Beregun, V.S. et al. (2015) *Information support for monitoring of thermal energy facilities*. Ed. by Babak V.P. Kiev [in Ukrainian].
5. Babak, V.P., Bogachev, I.V. (2015) *Matrix of small aperture magnetostrictive transducers*. Pat. 107629, Ukraine. ITTF NASU [in Ukrainian].

І. В. БОГАЧЕВ, Л. В. МЕЛЕШЧЕНКО

Інститут технічної теплофізики НАН України. 03057, м. Київ-57, вул. Желябова, 2а. E-mail: biv\_vdoc@ukr.net

#### ПОКРАЩЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТОСТРИКЦІЙНИХ СЕНСОРІВ

Розглянуто різні конструкції ультразвукових перетворювачів, що використовують магнітострикційний ефект і мають малу площу випромінюючої поверхні (діаметр хвилеводу 0,3...1,0 мм), що дозволяє створити в контрольованому зразку напівсферичну (ненапрявлену) поздовжню хвилю при зондуєму радіоімпульсному сигналі. Наведено схему стенду, за допомогою якого можна визначити основні характеристики і параметри складових елементів магнітострикційних сенсоров. Проаналізовано вплив різних факторів і параметрів на чутливість і потужність випромінювання перетворювачів. Висока чутливість сенсоров досягається також за рахунок використання спеціальних матеріалів з високими значеннями коефіцієнта магнітострикції та магнітострикції насичення, які піддаються певній технологічній обробці. Розглянуто способи забезпечення акустичного контакту між сенсорами і об'єктами контролю. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: діаграма напрямленості, акустичний контакт, малоапертурні магнітострикційні сенсори

#### IMPROVEMENT OF MAIN PARAMETERS OF MAGNETOSTRICTIVE TRANSDUCERS

I. V. BOGACHEV, L. V. MELESHCHENKO

Institute of Engineering Thermophysics of the NASU, 2a Zhelaybova str., Kiev-57, 03057. E-mail: lektron2007@gmail.com

Considered are different designs of ultrasonic transducers, applying magnetostrictive effect and having small surface radiation area (waveguide diameter 0.3-1.0 mm) that allows developing a semispherical (omnidirectional) longitudinal wave in a controlled object at probing radio-pulse signal. A scheme of a bench, which can help to determine the main characteristics and parameters of constituent elements of the magnetostrictive transducers, is provided. Effect of different factors and parameters on sensitivity and transducer radiation power was analyzed. High transducer sensitivity is also reached due to application of special materials with high values of coefficient of magnetostriction and magnetostriction saturation, which are subjected to specific technological treatment. The methods providing acoustic contact between the transducers and test objects were considered. 5 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: directional diagram, acoustic contact, low-temperature magnetostrictive transducers.

Поступила в редакцію  
01.02.2017