

## ДЕФЕКТОСКОПИЯ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Маликов В.Н.<sup>1,2</sup>, Зырянова А.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия (656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61), e-mail: pvv@asu.ru

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия (634021, г. Томск, пр. Академический 2/4)

---

Разработан сверхминиатюрный вихретоковый преобразователь для контроля физических параметров алюминий-магниевого сплава. Приведена структурная схема виртуализированного датчика на основе сверхминиатюрного преобразователя. В статье описаны результаты исследования визуальных крестообразных дефектов, смоделированных в сплаве алюминий-магний на глубине до 5 мм. Образы модельных дефектов получены с использованием Фурье-преобразователя измерителя электропроводности, разработанного авторами. Также с использованием указанного измерителя электропроводности была исследована электропроводность в области сварных швов, соединяющих пластин из алюминий-магниевого сплава. Показано, что трансформаторный накладной вихретоковый преобразователь, на основе которого был изготовлен измеритель электропроводности ферромагнитных материалов, и разработанный метод измерений позволяют с помощью виртуализированного измерителя электропроводности исследовать дефекты и неоднородности алюминий-магниевого сплава в процессе неразрушающего контроля.

---

Ключевые слова: неразрушающий контроль, сплав алюминий-магний, дефект, метод вихревых токов, электропроводность.

## CONTROL ALUMINIUM-MAGNESIUM ALLOY EDDY CURRENT

Malikov V.N.<sup>1,2</sup>, Zyrianova A.I.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Altai State University, Barnaul, Russia (656049, Barnaul, pr. Lenina, 61), e-mail: pvv@asu.ru

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia (634021, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4)

---

Designed miniature eddy current transducer to monitor physical parameters of aluminum -magnesium alloys. The block diagram of the sequenced -based sensor subminiature transducer is shown. This paper describes the results of a study of visual defects cruciate modeled in aluminum-magnesium alloy to a depth of 5 mm. Images of model defect obtained using Fourier converter conductivity meter developed by the authors. Either using said meter was studied electrical conductivity in the welds connecting the plates of an aluminum -magnesium alloys. It is shown that eddy current transducer probe on which the meter was made of non-ferromagnetic materials and electrical conductivity measurement method developed allows sequenced using conductivity meter to investigate defects and inhomogeneities of aluminum-magnesium alloys in the process of non-destructive testing.

---

Keywords: non-destructive testing, aluminum-magnesium alloy, defect, the method of eddy current, electrical conductivity

### Введение

В Алтайском государственном университете авторами статьи была разработана методика измерений и создан трансформаторный накладной вихретоковый преобразователь (ВТП), на основе которого был изготовлен измеритель электропроводности ферромагнитных материалов «ИЭНМ-2» (см., например, [6]). Разработанный метод измерений позволяет, с помощью виртуализированного измерителя электропроводности, решать универсальные задачи по получению, преобразованию и визуализации различной измерительной информации одним датчиком, интегрированным в составе специализированного программно-аппаратного комплекса. Анализ проведенных расчетов и

зависимостей импеданса от действительной части вносимого напряжения в измерительную обмотку ВТП для случая неферромагнитного материала показали, что с заданными параметрами датчика можно уверенно фиксировать измерительные сигналы, используя маломощные тракты звуковых адаптеров большинства современных персональных компьютеров [1]. В частности, данный метод позволяет исследовать дефекты и неоднородности алюминий-магниевых сплавов.

### **Принцип работы прибора**

В результате проведенного усовершенствования и оптимизации сконструированный прибор включает в себя только вихретоковый преобразователь, подключаемый к персональному компьютеру посредством звуковой платы. Вихретоковый преобразователь служит для преобразования измеряемой характеристики вещества (электропроводности или напряженности постоянного магнитного поля) в электрический сигнал. Преобразователь ВТП содержит возбуждающую, измерительную и компенсационную обмотку.

Принцип работы датчика основан на создаваемом в датчике переменном магнитном поле, локализуемом на объекте контроля при помощи ферритового сердечника пирамидальной формы. Форма сердечника обусловлена необходимостью локализации магнитного потока от возбуждающей (генераторной) катушки. Для материала сердечника в данной модели использовался среднечастотный малодиссипативный феррит 2000 НМЗ, выбранный по величине максимальной начальной магнитной проницаемости  $\mu_{max} = 5 \cdot 10^2 \text{ Гн/м}$ . Снаружи датчик заключен в диэлектрическую корундовую шайбу, которая предохраняет сердечник от механического контакта с объектом контроля [2, 3].

Электромагнитное поле генераторной обмотки возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте контроля. Плотность вихревых токов в объекте зависит от геометрических и электромагнитных параметров объекта, а также от взаимного расположения измерительного токовихревого преобразователя и объекта. Магнитное поле вихревых токов противоположно первичному магнитному полю генераторной обмотки, вследствие чего результирующее поле зависит от электромагнитных свойств контролируемого объекта и от расстояния между преобразователем и объектом, поскольку распределение плотности вихревых токов зависит от этих факторов. В измерительной обмотке преобразователя наводится ЭДС, которая и служит сигналом, передающим информацию об объекте в блок измерения [4].

В этом случае ЭДС измерительной обмотки уменьшается за счет противоположного магнитного поля создаваемого вихревыми токами.

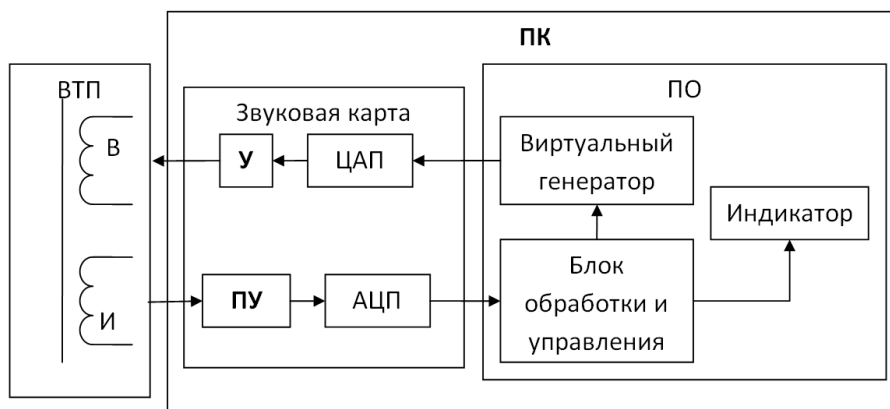


Рис. 1. Структурная схема устройства

Устройство измерения состоит из трех основных частей:

- Токвихревой преобразователь (ВТП);
- Звуковая карта ПК;
- Программное обеспечение (ПО).

Программное обеспечение можно также условно разделить на три блока:

- Виртуальный генератор;
- Блок обработки и управления;
- Индикатор.

Виртуальный генератор подает цифровой сигнал на вход цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) звуковой карты, где он преобразовывается в аналоговый. В свою очередь, аналоговый сигнал проходит усилитель мощности (У) и подается на возбуждающую обмотку (В) ВТП. Проходя по возбуждающей обмотке ВТП, синусоидальный сигнал создает электромагнитное поле, которое, в свою очередь, наводит ЭДС в измерительной обмотке (И) ВТП. Это напряжение поступает на микрофонный вход звуковой карты и после прохождения предусилителя (ПУ) поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) звуковой карты. Аналоговый сигнал преобразовывается в цифровой и передается в блок обработки и управления программного обеспечения. Блок обработки и управления фиксирует уровень цифрового сигнала в условных единицах.

Этот уровень принимается за уровень нуля, соответствующего уровню напряжения на измерительной катушке без объекта контроля. При отсутствии объекта контроля индикатор показывает нуль, соответствующий нулевому значению электропроводности.

Определение величины электрической проводимости можно произвести, установив соответствие между значением фиксируемого сигнала на измерительной обмотке и

значением электропроводности материала. Для установления этого соответствия может быть использована аппаратная кривая.

Для ее построения была проведена серия измерений величины электрической проводимости у эталонов с заранее известной электропроводностью [5]. После этого уровень напряжения на измерительной обмотке, фиксируемый блоком управления в условных единицах, сопоставлялся каждому значению электропроводности. По полученным значениям проводилась аппроксимация, результатом которой и являлась аппаратная кривая. Используя построенную кривую, производится расчет величины локальной электрической проводимости материалов.

### **Описание эксперимента**

Для исследования проводящего материала использовался программно-аппаратный комплекс «ИЭНМ-2» (измеритель электропроводности неферромагнитных материалов), разработанный ранее авторами.

Для демонстрации эффективности предлагаемого метода использовалась структура, представляющая из себя две пластины из сплава алюминий-магний, соединенных с помощью сварки трением. Толщина пластин составляла 5 мм. Целью эксперимента являлось сканирование поверхности пластин и исследование отклика вихретокового преобразователя (ВТП) в области сварного шва. Ширина сварного шва составляла 3.2 мм. Схема сканирования изображена на рис. 2.

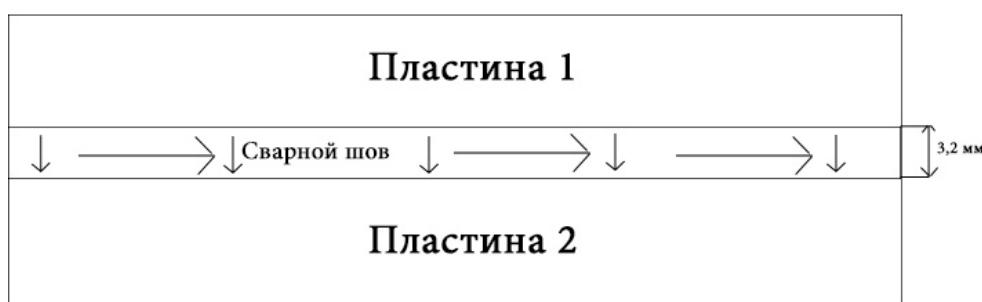


Рис. 2. Расположение преобразователя относительно сварного шва

Сканирование осуществлялось в направлениях, указанных стрелками на рис. 2.

Сканирование осуществлялось на частоте 20 000 Гц, 15 000 Гц и 10 000 Гц. Топология противоположа, полученного при сканировании, была визуализирована с помощью специального программного обеспечения и представлена на рис. 3.

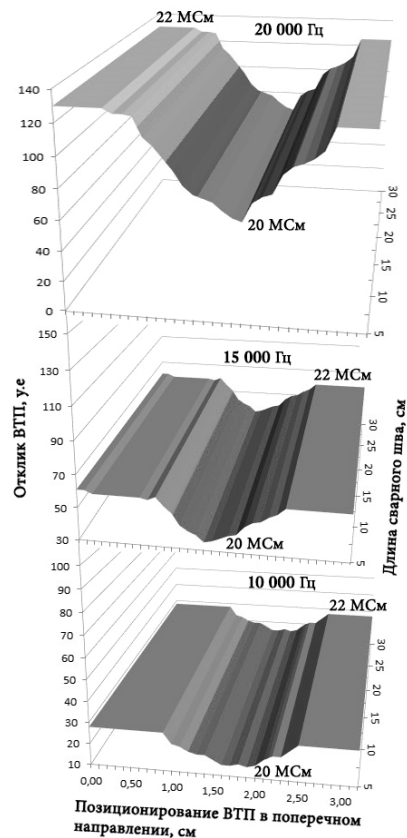


Рис. 3. Величина отклика и соответствующие ему значения электропроводности в области сварного шва листов из сплава алюминий-магний толщиной 5 мм

Также был проведен аналогичный эксперимент по исследованию второго образца, представляющего собой две пластины, толщиной 8.3 мм, соединенные сварным швом, однако в данном эксперименте было установлено, что пластины имеют разную электрическую проводимость, что, очевидно, указывает на различные материалы пластин. Результаты эксперимента представлены на рис. 4.

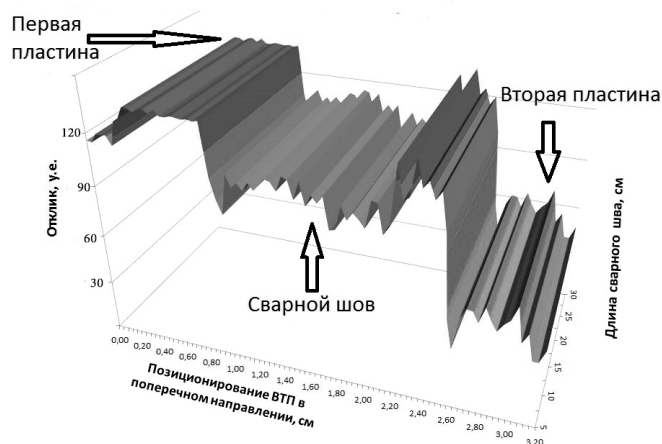


Рис. 4. Величина отклика и соответствующие ему значения электропроводности в области сварного шва листов из сплава алюминий-магний и неизвестного сплава, толщиной 8.3 мм

Для исследования корреляции электропроводности с дефектами материалов, использовалась структура, представляющая из себя лист металла из сплава алюминий-магний толщиной 5 мм с поверхностным дефектом крестообразной формы, имеющим размеры 3,2/1,9 мм и толщиной 0.1 мм. Датчик находился на противоположной дефекту поверхности листа. Сканирование осуществлялось на частоте 15 000 Гц. Расположение преобразователя относительно дефекта показано на рис. 5.

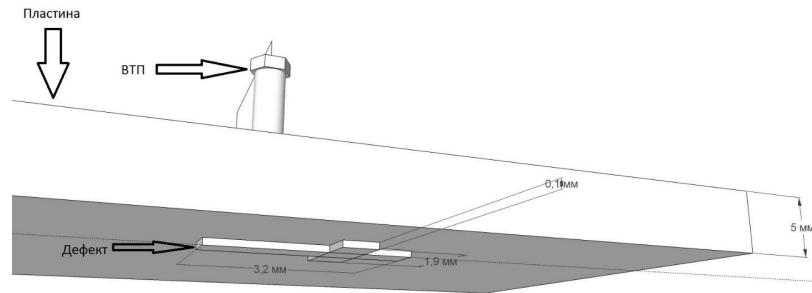


Рис. 5. Расположение преобразователя относительно дефекта пластины

Сканирование осуществлялось в направлении, указанном стрелками на рис. 6.

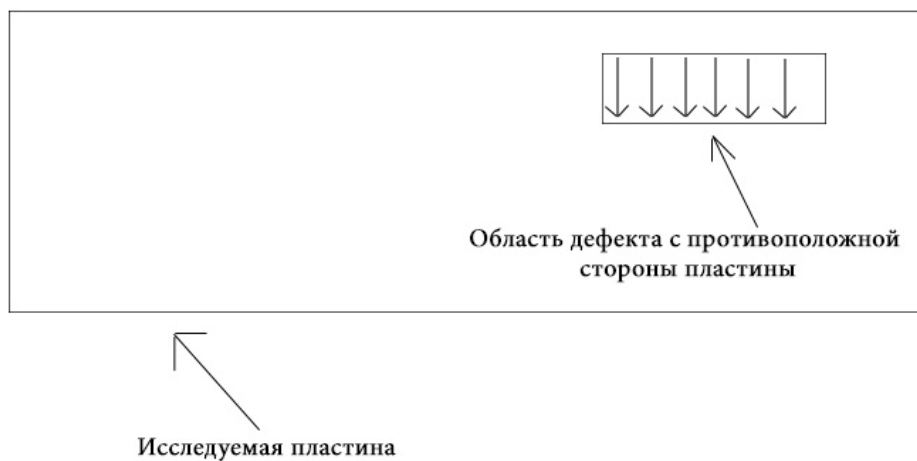


Рис. 6. Направление сканирования пластины

Топология противополя при сканировании была визуализирована с помощью специального программного обеспечения и представлена на рис. 7.

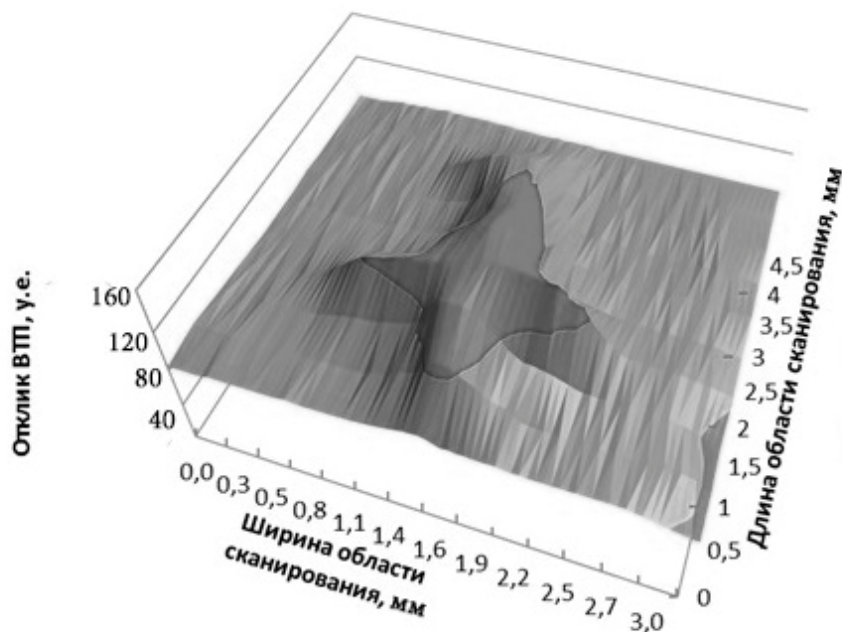


Рис. 7. Топология противоположа области сканирования с дефектом, расположенным на обратной стороне листа

### Заключение

В работе показано, что созданный в Алтайском государственном университете трансформаторный накладной вихретоковый преобразователь, на основе которого был изготовлен измеритель электропроводности неферромагнитных материалов «ИЭНМ-2» (см., например, [6]), и разработанный метод измерений, позволяют с помощью виртуализированного измерителя электропроводности решать универсальные задачи по получению, преобразованию и визуализации различной измерительной информации одним датчиком, интегрированным в составе специализированного программно-аппаратного комплекса. В частности, данный метод позволяет исследовать дефекты и неоднородности алюминий-магниевого сплава в процессе неразрушающего контроля.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0063) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218.*

### Список литературы

1. Дмитриев С.Ф. Особенности реализации аппаратной части виртуализированных измерительных приборов в методе вихревых токов / С.Ф. Дмитриев, Д.Н. Лященко, А.Н. Новоженков, А.В. Ишков // Ползуновский вестник. – 2010. - № 2. – С. 118.

2. Дмитриев С.Ф. Виртуализированный измеритель-трансформер / С.Ф. Дмитриев, В.Н. Маликов, А.В. Ишков, А.М. Сагалаков // Датчики и системы. – 2013. - № 3. – С. 22-26.
3. Дмитриев С.Ф. Исследование неоднородных материалов методом вихревых токов. / С.Ф. Дмитриев, В.Н. Маликов, А.В. Ишков, А.М. Сагалаков // Известия Алтайского государственного университета. – 2013. - № 1-1. – С. 197-201.
4. Ишков А.В. Сверхминиатюрные вихретоковые преобразователи для виртуализированных приборов неразрушающего контроля/ А.В. Ишков, С.Ф. Дмитриев, Д.Н. Лященко // Контроль. Диагностика. – 2011. - № Sp. – С. 102-107.
5. Ишков А.В. Модель отклика вихретокового преобразователя для задач толщинометрии / А.В. Ишков, С.Ф. Дмитриев, Д.Н. Лященко // Известия Алтайского государственного университета. - 2010. -№ 1-2. -С. 162-167.
6. Маликов В.Н. Сверхминиатюрные вихретоковые преобразователи для задач неразрушающего контроля ферромагнитных материалов/ В.Н. Маликов, С.Ф. Дмитриев, А.В. Ишков // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55. - № 9-2. – С. 292-293.

**Рецензенты:**

Тарасов С.Ю., д.т.н., ведущий научный сотрудник Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск.

Сизова О.В., д.т.н., главный научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск.