

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР ТИПА МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-МЕТАЛЛ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

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

<sup>1</sup>Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия (656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61), e-mail: zir.ispms@mail.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 слоистых структур типа металл-диэлектрик-металл. Описан принцип работы датчика на основе разработанного преобразователя. Приведен алгоритм программного обеспечения, управляющего датчиком. Описаны результаты исследования слоистых структур типа металл-диэлектрик-металл. Проведены исследования зависимости отклика преобразователя от толщины слоистой среды с проводящей основой и без основы. Показано, что амплитуда возникающего противополя уменьшается как с увеличением размеров диэлектрических структурных элементов, так и с увеличением частоты индуцируемого электромагнитного поля. Предложенная модификация вихретокового метода, основанная на применении сверхминиатюрных датчиков с повышенной локальностью измерений, позволяет проводить надежную диагностику структуры композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов. Разработанное измерительное устройство показало свою перспективность для контроля дефектов в этих материалах.

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

## INVESTIGATION OF THE LAYERED STRUCTURE OF THE METAL-INSULATOR-METAL EDDY CURRENT

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

<sup>1</sup>Altai State University, Barnayl, Russia (656049, Barnayl, pr. Lenina, 61), e-mail: zir.ispms@mail.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)

Miniature eddy current probe for layered structures of the metal-insulator-metal transition is designed. The principle of operation of the sensor based on the developed converter is described. The algorithm of the software that controls the sensor is shown. This paper describes the results of a study of layered structures of the metal-insulator-metal. Relations between the thickness and the transducer response of the layered medium with a conductive substrate and without foundation are shown. It is shown that the counterfield amplitude decreases with increasing size of the structural elements of the dielectric, and with increasing of electromagnetic field frequency. The proposed modification of the eddy current method based on the use of subminiature sensors with increased local measurements, allows a reliable diagnosis structure of composite materials based on aluminum alloys. Developed measuring device has shown promise for the control of defects in these materials.

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

### Введение

Метод вихретокового контроля вместе с ультразвуковыми [6] и рентгеноскопическими исследованиями является одним из самых важных методов неразрушающего контроля в настоящее время. Кроме того, в последние годы опубликованы результаты, свидетельствующие о перспективности применения электромагнитных методов при разрушающем контроле материалов [4]. Метод основывается на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя (ВП) и контролируемого объекта.

Конструкция подобных преобразователей может меняться в зависимости от типа и свойств контролируемого объекта, материалов, используемых в нем, или от его топологии. Для исследования проводящих неферромагнитных материалов, как правило, используют трансформаторные накладные ВТП, содержащие не менее двух катушек, – возбуждающую и измерительную.

Основной информативный параметр метода вихревых токов – это обобщенный параметр  $\beta_0$ . Данный параметр представляет собой функцию параметров самого ВТП, природы материала, а также видов и параметров дефекта.

Особое место в неразрушающем контроле в настоящее время занимает исследование слоистых металлополимерных композитов типа металл-диэлектрик-металл. Это, например, листовые материалы облицовочных панелей, сотовые панели, щиты звуко- и теплоизоляции самолетов, отражающие радиацию покрытия оборудования и приборов, декоративные металлопластиковые панели, материалы для изготовления печатных плат и другие подобные композиты, содержащие от одного до двух и более металлических слоев, разделенных диэлектрическими прослойками [5].

Дефектоскопия слоистых композитов применяется для нахождения нарушений сплошности металлического слоя, для контроля количества и толщины слоев, для нахождения перемычек между слоями или для анализа поверхности металлического слоя. Основной характеристикой, чувствительной к данным дефектам, является величина локальной электропроводности материала и ее распределение по поверхности каждого слоя.

Авторами статьи была разработана методика измерений и создан трансформаторный накладной вихретоковый преобразователь, на основе которого был изготовлен измеритель электропроводности неферромагнитных материалов «ИЭНМ-2» (см., например, [1]). 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 показал, что с заданными параметрами датчика можно уверенно фиксировать измерительные сигналы, используя маломощные тракты звуковых адаптеров большинства современных персональных компьютеров [2].

В частности, данный метод позволяет исследовать дефекты и неоднородности слоистых структур типа металл-диэлектрик-металл, например, состоящий из алюминия и бумаги. Разработанный программно-аппаратный комплекс отображает информацию,

полученную от датчика в реальном времени, и при желании пользователя сохраняет ее на жесткий диск. Программное обеспечение использует алгоритм, приведенный на рис. 1, для определения величины проводимости и напряженности постоянного магнитного поля, значение которого может быть использовано при работе в сильных магнитных полях для корректировки показаний датчика.

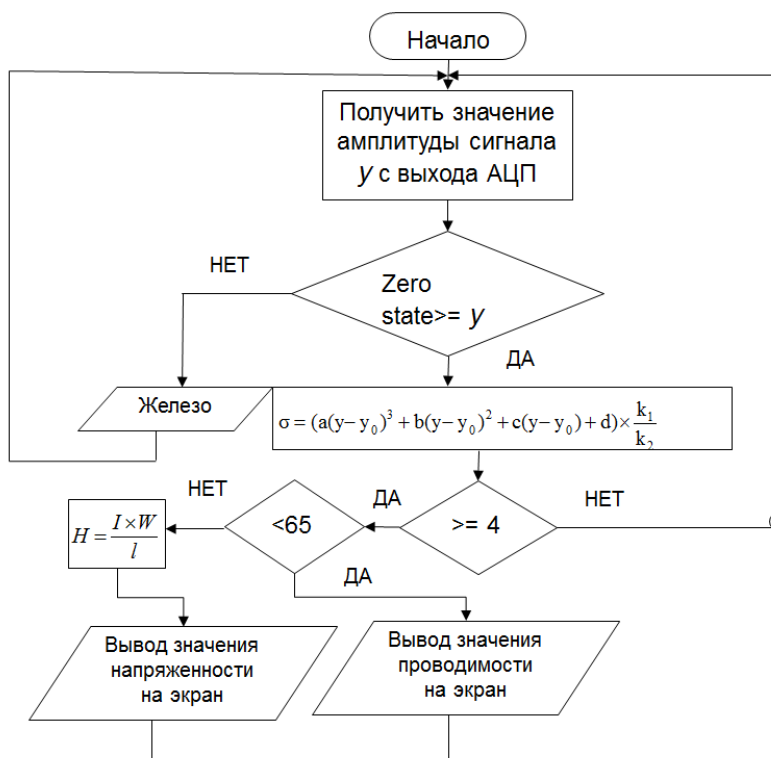


Рис.1 – Алгоритм работы программной части датчика.

### Методика проведения исследований

МПСК и модели их дефектом изготавливались чередованием слоев алюминиевой фольги, имеющих толщину 100 мкм со слоями бумаги толщиной 100 мкм. Из данных материалов вырезали образцы, формировали пакет заданного строения и осуществляли его прессование при температуре 110-120<sup>0</sup>С и давлении 5-10 МПа в течение 3 минут.

### Результаты и обсуждение

Основной характеристикой МПСК, чувствительной к дефектам исследованного типа, является электропроводность материала металлического слоя. Как было показано ранее [3], она входит в неоднородное уравнение Гельмгольца для векторного потенциала поля вихревых токов многослойной среды, наряду с магнитной проницаемостью материала, и стремится к значению этого параметра для сплошного объемного материала по мере увеличения количества слоев в МПСК и уменьшения толщины диэлектрических прослоек. При этом вклад в величину напряжения, вносимого в измерительную обмотку сверхминиатюрного ВТП с высокой локальностью и отношением радиусов приемной и передающей катушек не менее 0,2-0,4 от каждого нового слоя, будет составлять от 10 до

25%, чего вполне достаточно для фиксации любым измерительным прибором с величиной абсолютной допускаемой погрешности не более 3-5 %.

На рисунке 2 приведена зависимость интенсивности противополя от толщины слоистой среды. Слоистая среда формируется из последовательных слоев фольги и бумаги с толщиной 100 мкм. Возрастание интенсивности противополя связано с толщиной слоистого образца, так, при толщине образца 100 мкм интенсивность противополя 7 у.е., зазор в 100 мкм уменьшает интенсивность до 6 у.е. Брикет из двух слоев фольги со 100 мкм диэлектрической прослойкой дает 12 у.е., зазор в 100 мкм уменьшает интенсивность до 10 у.е. Таким образом реализуется модель слоистой среды и воздействия ВТП на среду низкочастотным электромагнитным полем, когда датчик находится на проводящей поверхности либо имеется зазор 100 мкм. Интенсивность противополя от слоистого брикета соответствует интенсивности противополя монолита, когда брикет содержит 19 слоев – 10 слоев фольги по 100 мкм, переложенных 9 слоями бумаги толщиной в 100 мкм.

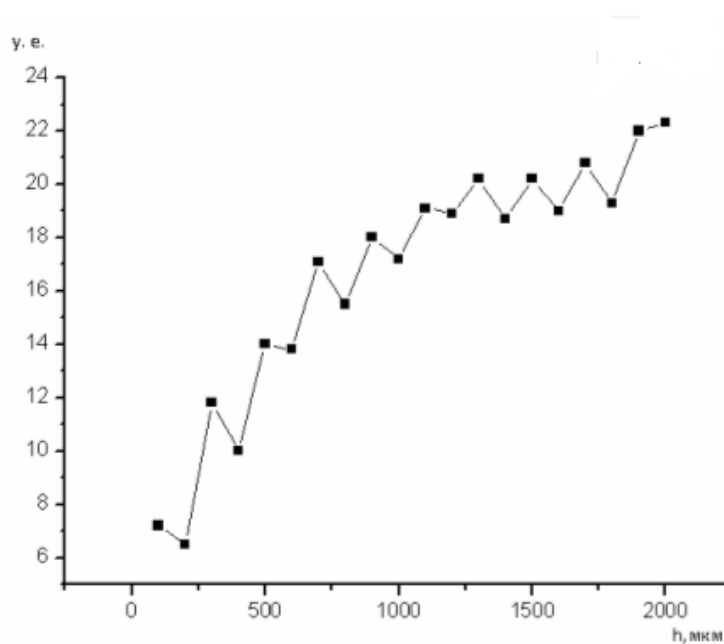


Рис. 2 – Фольга алюминий 100 мкм + бумага 100 мкм без основы (частота возбуждения 3500 кГц)

На рисунке 3 приведена зависимость показаний прибора ИЭНМ-5ФА от расстояния датчика до поверхности слоистого композита алюминий-полиэтилен-алюминий, расположенного на медной основе толщиной 5мм.

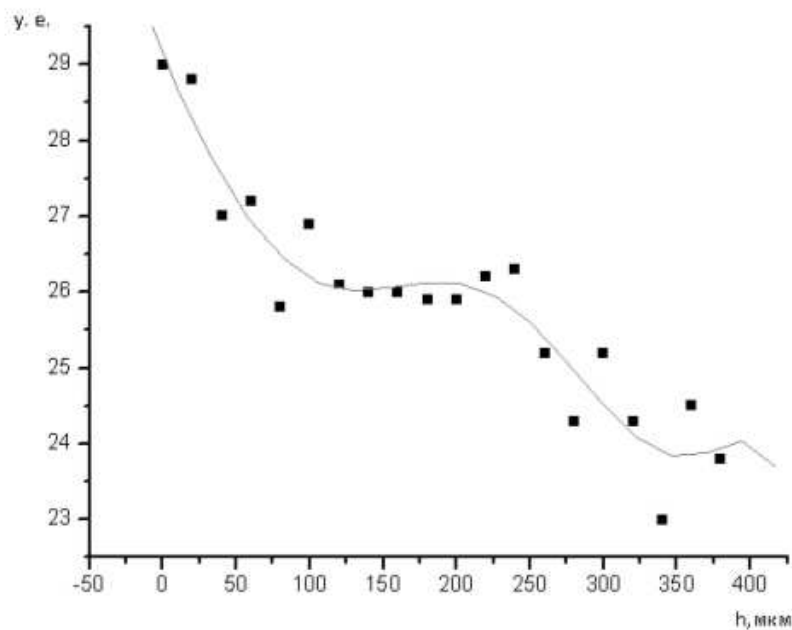


Рис. 3 – Основа медь, покрытия чередование слоя фольга алюминий 20 мкм + полиэтилен 20 мкм (частота возбуждения 3500 кГц)

МПКС, использованный в данном эксперименте, был получен чередованием 2-х слоев алюминиевой фольги (20 мкм) и одним слоем полиэтилена низкого давления (20 мкм). Измерения проводились на частоте возбуждения 35кГц, материал основы – медь М1.

Как следует из рисунка 3, образец такого композита по отношению к медной основе выполняет функцию экрана, введенного в зазор между датчиком прибора и медной основой и постепенно ослабляющего измеренный сигнал.

На расстоянии 100-250 мкм от поверхности композита наблюдается участок, на котором показания прибора сохраняют почти постоянные значения. Очевидно, что на таком удалении от проводящей медной основы топология поля вихревых токов контролируемого образца воспринимается датчиком прибора как поле от однородной среды и появление любого дефекта в материале вызовет отклонение его показаний от среднего значения, измеренного на расстоянии 100-250мкм.

Проведение дефектоскопии МПКС в таком случае возможно при настройке показаний прибора на ноль на бездефектной области (с постоянным значением условной электропроводности) и использовании полого наконечника, выдерживающего постоянное расстояние между поверхностью материала и ВТП в интервале 100-250мкм.

### **Заключение**

Результаты исследования зависимости интенсивности противополя от толщины материала с диэлектрическими прослойками и зазора между источником поля и образцом показали, что амплитуда возникающего противополя уменьшается как с увеличением

размеров диэлектрических структурных элементов, так и с увеличением частоты индуцируемого электромагнитного поля. Предложенная в работе модификация вихретокового метода, основанная на применении сверхминиатюрных датчиков с повышенной локальностью измерений, позволила проводить надежную диагностику структуры композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов. Разработанное измерительное устройство, реализующее предложенный подход, показало свою перспективность для контроля дефектов в этих материалах.

*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.В. Новоженков, А.В. Ишков // Ползуновский вестник. – 2010. - № 2. – С. 118-122.
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. Кривецкий А.В. Контроль разрушения некоторых металлических изделий по сигналам электромагнитного излучения / А.В. Кривецкий, А.А. Бизяев, Г.Е. Яковицкая // Физ. мезомех. – 2011. – Т. 14. - № 4. – С. 39-44.
5. 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.
6. Cikalova U. Evaluation of Al-specimen fatigue using a «smart sensor» / U. Cikalova, M. Kroening, J. Schreiber, Ye Vertyagina // Физ. мезомех. – 2011. – Т. 14. - № 5. – С. 107-114.

### 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.