

УДК 620.179.118.415.05

*В. В. Поляков, С. Ф. Дмитриев, А. В. Ишков, Е. А. Колубаев, В. Н. Маликов*  
**Диагностика композиционных материалов на основе  
алюминиевых сплавов с помощью сверхминиатюрных  
вихретоковых преобразователей\***

*V. V. Polyakov, S. F. Dmitriev, A. V. Ishkov, E. A. Kolubaev, V. N. Malikov*  
**Diagnostics of Composite Materials on Aluminum Alloys  
Using Miniaturized Eddy Current Transducer**

Предложена модификация метода вихретоковой диагностики, основанная на использовании сверхминиатюрных вихретоковых датчиков с локализацией контролируемой области поверхности материала до 50 мкм<sup>2</sup>. Приведены результаты измерений для модельного композиционного материала, представлявшего из себя чередующиеся проводящие и диэлектрические слои системы А1–ПЭНД–А1. Дефекты строения задавались путем отклонений в количестве и порядке чередования слоев. Показана перспективность предложенного подхода и реализующего его измерительного устройства при дефектоскопии композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, композит, дефект, метод вихревых токов.

**DOI** 10.14258/izvasu(2013)1.2-37

**Введение.** Метод вихревых токов, наряду с ультразвуковыми и рентгеноскопическими исследованиями, является одним из основных неразрушающих методов контроля и диагностики дефектов в различных материалах и изделиях [1]. Основным информативным параметром в этом методе является напряжение, вносимое в измерительную обмотку первичного датчика — вихретокового преобразователя. Данная величина зависит от состава и структуры материала, вида и параметров дефектов его строения, частоты переменного электромагнитного поля, возбуждающего вихревые токи, а также от технологических факторов — конструкции и параметров датчика, величины зазора между датчиком и поверхностью материала и т. д. В силу этого в зависимости от конкретных условий диагностики и контроля приходится изменять конструкцию и технологические характеристики датчика. Такие изменения призваны обеспечить высокую чувствительность обнаружению тех или иных видов дефектов в конкретном материале.

Среди объектов неразрушающего контроля особое место занимают композиционные материалы. В силу особенностей своего строения и технологии получения эти материалы характеризуются высокой неоднородностью, поэтому произведенные из них изделия нуждаются в постоянном контроле с получением подроб-

It is proposed to modify eddy current method of diagnostics based on applying sub-miniaturized eddy current sensors with localization of a controlled surface area of the material to 50 mkm<sup>2</sup>. The measurement results for model composition material which represent alternating conductive and dielectric layers of Al-HDPE-Al are shown. Defects in the structure were set by variations in the number and order of alternating layers. The prospects of the proposed approach and implementing it with a measuring device in a process of fault detection of composite materials on aluminum alloys are described.

**Key words:** nondestructive testing, composite, defect, method of eddy currents.

ной информации о дефектности структуры [2]. Такую информацию позволяется получить накладные датчики в виде сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей [3], отличительной особенностью которых является высокая степень локализации контролируемой области. В настоящей работе рассматривается применение таких датчиков к модельному композиционному материалу со специально задаваемыми неоднородностями структуры, моделирующими дефекты в реальных изделиях из ферромагнитных сплавов на основе алюминия.

**Материалы и методика измерений.** Образцы для измерений изготавливались из чередующихся металлических слоев алюминиевой фольги (ГОСТ 745–2003) толщиной 20–100 мкм и диэлектрических слоев из пленки полиэтилена низкого давления (ПЭНД) марки М толщиной 20 мкм (ГОСТ 10354–82). Многослойные образцы системы А1–ПЭНД–А1 моделировали реальный композиционный материал. Дефекты строения задавались путем изменения количества слоев и порядка в их чередовании.

При проведении исследований использовалось оригинальное измерительное устройство ИЭНМ-5ФА со специально разработанным сверхминиатюрным вихретоковым датчиком, описанное в [3] и позволявшее определять электропроводность в немагнит-

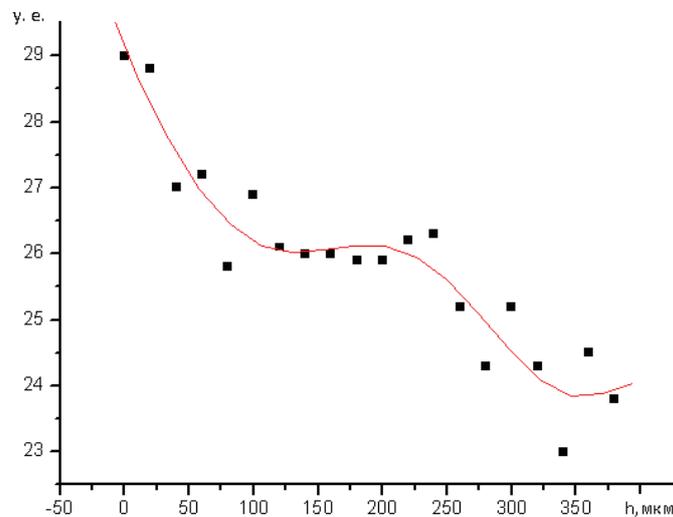
\* Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного Министерством образования и науки РФ (договор №02.G25.31.0063).

ных металлических материалах. Датчик был выполнен по дифференциальной схеме включения катушек и позволял локализовать область контроля вплоть до 50 мкм<sup>2</sup>. Рабочая частота при измерениях составляла 0,3–300 кГц, напряжение тока на передающей катушке вихретокового преобразователя равнялось 3,5–4,5В. Абсолютная калибровка прибора осуществлялась по ГСО меди марки 3435-89П-3446-89П (415 МСм/м, ГОСТ 27333–87). Одновременно с измерениями проводилась визуализация амплитудно-частотных характеристик сигнала от приемной катушки сверхминиатюрного вихретокового преобразователя в режиме реального времени. Это позволяло использовать измерительное устройство в режиме дефектоскопии. В таком режиме данные, полученные для контролируемого объекта, могли сопоставляться с параметрами дефектов, предварительно найденными для модельного материала.

**Экспериментальные результаты.** Основной характеристикой диагностируемого материала, чувствительной к задававшимся дефектам, являлась удельная электропроводность  $\sigma$  его металлических слоев. Роль магнитной проницаемости, весьма существенная в случае ферромагнитных металлов, для алюминиевых композитов пренебрежимо мала [4]. По мере увеличения количества про-

водящих слоев и уменьшения толщины диэлектрических прослоек величина удельной электропроводности стремится к значению  $\sigma$  для сплошного объемного материала.

При проведении испытаний на образцах трехслойного композита А1-ПЭНД-А1 была установлена зависимость измерявшейся удельной электропроводности от зазора  $h$  между поверхностью материала и вихретоковым преобразователем. Результаты измерений приведены на рисунке. Как следует из рисунка, на расстоянии от 100 до 250 мкм до поверхности материала наблюдался участок, на котором значения электропроводности сохраняли примерно постоянные значения. Это означало, что на таком удалении от поверхности поле вихревых токов воспринималось сверхминиатюрным вихретоковым преобразователем как поле от однородной среды [5]. На этом участке появление дефекта с локальностью до 50 мкм<sup>2</sup> должно вызывать отклонение показаний измерительного устройства от среднего значения, соответствовавшего зазору в 100...250 мкм для бездефектного образца. Дальнейшие измерения проводились с помощью специально изготовленной оснастки, позволявшей выдерживать постоянное расстояние между поверхностью образцов и датчиком в указанном интервале.



Зависимость удельной электропроводности (в условных единицах) образцов 3-слойного композита А1-ПЭНД-А1 от зазора

Испытания были осуществлены для образцов многослойных неферромагнитных композиционных материалов системы А1-ПЭНД-А1 с задававшимися в них модельными дефектами в виде нарушения количества и порядка чередования слоев. Проведенные измерения выявили изменение величины удельной электропроводности в зоне дефекта, соответствовавшее 5–8 условным единицам. Поскольку абсолютная погрешность измерений не превышала 0,2 условных единицы, наблюдалось 20–40-кратное превышение измерявшегося сигнала

над шумом. Таким образом, задававшиеся дефекты строения надежно фиксировались с помощью сверхминиатюрного вихретокового преобразователя.

Наряду с описанными измерениями при сканировании поверхности образца определялись в реальном режиме времени амплитудно-частотные характеристики снимаемого с датчика сигнала. Получавшиеся значения обрабатывались с помощью специально разработанной программы и представлялись визуально на экране измерительного устройства в виде спек-

трального Фурье-разложения сигнала. Появление дефекта в зоне сканирования отчетливо проявлялось в виде искажения спектра сигнала, что обеспечивало возможность непосредственного обнаружения дефекта оператором при проведении контроля изделия.

**Выводы.** 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.

### Библиографический список

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2, кн. 2: Федосенко Ю.К., Герасимов В.Г., Покровский А.Д. и др. Вихретоковый контроль. — М., 2003.

2. Поляков В.В., Егоров А.В., Лепендин А.А. Моделирование пластической деформации и разрушения пористых материалов // Письма в Журнал технической физики. — 2005. — Т. 31, вып. 4.

3. Дмитриев С.Ф., Ишков А.В., Лященко Д.Н. Виртуализированные измерительные приборы, реализующие ме-

тод вихревых токов // Научные исследования: информация, анализ, прогноз. — Воронеж, 2010. — Кн. 28.

4. Егоров А.В., Поляков В.В., Иваков С.В. Измерительно-вычислительный комплекс для определения удельной электропроводности и магнитной проницаемости методом вихревых токов // Ползуновский вестник. — 2010. — №2.

5. Дмитриев С.Ф., Тарусин Д.Ю., Ишков А.В., Сагалаков А.М. Об одной модели отклика вихретокового преобразователя // Вестник ТГУ: бюлл. опер. науч. инф. — 2006. — № 64.