

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХ- И ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ РЗМ, С ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИБОРОВ

Новоженов А.В., Ишков А.В.\*, Дмитриев С.Ф.

ГОУ ВПО «Алтайский государственный университет»,

\* ФГОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет»  
г. Барнаул

Многокомпонентные металлические системы, содержащие редкоземельные металлы (РЗМ), находят широкое применение в современной технике и машиностроении. Сплавы РЗМ с ферромагнитными металлами подгруппы железа (Fe, Co, Ni) используются в качестве основы магнитов с высокими значениями коэрцитивной силы, находящихся применение в электрических двигателях, системах магнитной подвески высокоскоростных поездов, обмотках сверхпроводящих магнитов, исследовательской аппаратуре [1]. Двойные сплавы РЗМ с кальцием, алюминием и магнием, а также трехкомпонентные системы РЗМ с щелочноземельными металлами Ga и In, находят применение в авиационно-космической отрасли для создания легких конструкционных материалов и в качестве лигатур (0,01 – 0,03 %) для раскисления чугунов и сталей и придания им повышенной прочности и высокой холодостойкости [2].

Получение двух- и трехкомпонентных металлических систем с РЗМ сопряжено с рядом трудностей, вызванных их высокой реакционной способностью, высокими потенциалами восстановления и образованием интерметаллидов. Как правило, этот процесс проводят многостадийно, с начала получая высоколегированную лигатуру с РЗМ методами вакуумной плавки или металлотермии из соответствующих галогенидов. Оперативный контроль и корректировка состава получающихся при этом продуктов имеет исключительное значение, так как промежуточные составы при добавлении остальных компонентов способны образовывать многочисленные химические соединения, а стоимость исходных материалов чрезвычайно велика.

Аппаратурное оформление технологических процессов и сложные взаимодействия в металлических системах требуют применения новых методов контроля, более оперативных, чем химический и более точных, чем спектральный анализ. Исследование электрических характеристик является одним из таких методов, однако его классическое

оформление требует надежного электрического контакта между исследуемым материалом и потенциальными и токовыми электродами, что невозможно в случае исследуемых систем, вследствие постоянного окисления одного или нескольких их компонентов.

Свободным от указанных недостатков является метод вихревых токов (МВТ), с помощью которого могут быть осуществлены структурные и физико-механические исследования металлов и сплавов [3].

Ранее нами была реализована схема виртуализированных приборов для измерения различных физико-химических параметров с использованием МВТ и маломощных накладных вихретоковых датчиков, подключаемых непосредственно к входу/выходу звуковой карты ЭВМ, работающей в полнодуплексном режиме [4].

Целью настоящей работы является исследование электрических характеристик двойных систем Ce-Al, Ce-Ga, Ce-In и тройной системы Ce-Mg-Ga с помощью виртуализированного измерителя электропроводности неферромагнитных материалов ИЭНМ-10.

Как известно, основными требованиями в методе вихревых токов являются локализация зоны контроля, отстройка от зазора, чистота подготовки поверхности. Для выполнения данных требований нами были разработаны сверхминиатюрные вихретоковые преобразователи (СМВТП), эксплуатируемые в качестве аппаратной части виртуализированного прибора.

Использованный виртуализированный прибор ИЭНМ-10, представляет собой программно-аппаратный комплекс для исследования электропроводности неферромагнитных материалов. Комплекс состоит из трех основных частей: вихретокового преобразователя (СМВТП); звуковой карты персонального компьютера (ПК) и программного обеспечения прибора (ПО) (рисунок 1).

Цифровой сигнал от виртуального генератора прибора ИЭНМ-10 поступает на ЦАП звуковой карты и преобразуется в аналого-

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХ- И ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ РЗМ, С ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИБОРОВ

вый. Аналоговый сигнал, с выхода усилителя мощности ( $У$ ) нагружен на генераторную катушку ( $Г$ ) СВВТП и возбуждает вихревые токи в исследуемом образце и противоположе, характеристики которого зависят от электрофизических характеристик материала. Электромагнитное поле наводит ЭДС в приемной катушке ( $П$ ) СВВТП, которое, после усиленная микрофонным усилителем, поступает на вход АЦП звуковой карты. Оцифрованный сигнал поступает на программный блок обработки и управления. Блок обработки и управления фиксирует уровень цифрового сигнала в условных единицах. Этот уровень принимается за уровень нуля, и соответствует уровню напряжения на сигнальной катушке без объекта контроля. На индикатор выводится ноль, который и соответствует нулевому значению электропроводности.



Рисунок 1 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса прибора ИЭНМ-10

Для расчета величины электрической проводимости необходимо установить соответствие между уровнем сигнала на сигнальной катушке и электропроводностью материала. Одним из вариантов установления этого соответствия служит аппаратная кривая, для построения которой был использован набор ГОСТ-ированных контрольных образцов, имеющих заранее известную электропроводность. Удельная электрическая проводимость использованных образцов была определена при помощи двойного моста Уитстона при температуре  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  с погрешностью не более 1%.

Тестирование комплекса осуществлялось по сериям измерений электропроводности эталонных материалов. В процессе измерения изменялось число замеров электропроводности для каждого образца, и рассчитывалось среднее значение электропроводности по каждой группе измерений. Основная погрешность измерения, связанная с девиацией зазора и отклонением установки СВВТП от нормального положения, закономерно снижается с ростом числа замеров и увеличением времени каждого замера. Абсолютное значение среднего взвешенного основной

погрешности, полученное в серии опытов, не превысило  $0,8 \text{ МСм/м}$ .

Для решения проблемы совместимости ПО с произвольным АЦП/ЦАП может быть использована эталонная звуковая карта и зависимость между уровнем напряжения на сигнальной катушке и условными единицами сигнала на выходе ее АЦП, для которой определяется коэффициент наклона  $k$ . Затем проводится аппроксимация зависимости электропроводности образцов от сигнала АЦП карты полиномом третьей степени:

$$\sigma = a(y - y_0)^3 + b(y - y_0)^2 + c(y - y_0) + d, \quad (1)$$

где  $\sigma$  - значение электропроводности объекта контроля,  $\text{МСм/м}$ ;  $y$  - условные единицы сигнала на выходе АЦП звуковой карты;  $y_0$  - условные единицы шумового сигнала на выходе АЦП звуковой карты;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  - коэффициенты аппроксимации.

Для остальных звуковых карт также устанавливается соответствие между уровнем напряжения на сигнальной катушке и условными единицами сигнала на выходе АЦП, которые затем приводятся к показаниям эталона по формуле:

$$y_1 = \frac{k_1}{k_2} y_2, \quad (2)$$

где  $y_1$  - приведенное значение условных единиц эталонной карты;  $y_2$  - количество условных единиц текущей карты;  $k_1$  - коэффициент наклона для эталонной карты;  $k_2$  - коэффициент наклона для текущей карты.

Тогда, значение электрической проводимости, измеренное по уровню сигнала с любой произвольной звуковой карты, можно рассчитывать по следующей модифицированной формуле:

$$\sigma = (a(y - y_0)^3 + b(y - y_0)^2 + c(y - y_0) + d) \times \frac{k_1}{k_2}, \quad (3)$$

Параметры указанной калибровочной зависимости для различных эталонов и звуковых карт находятся в текстовом файле и заносятся в память прибора при запуске программы и калибровке. Программное обеспечение для виртуализированного прибора ИЭНМ-10 написано на языке C++ под операционную систему MS Windows 95/98/2000/XP и имеет интерактивный оконный интерфейс.

В рабочем окне прибора ИЭНМ-10 (рисунок 2) имеется индикатор амплитуды входного сигнала, где отображается значение амплитуды сигнала, полученное в результате обработки каждого буфера и индикатор электропроводности, который отображает расчет-

ное значение электропроводности. Дополнительно, на основе получаемых данных, осуществляется разделение металлов на ферромагнитные и неферромагнитные, а также идентификация металла.

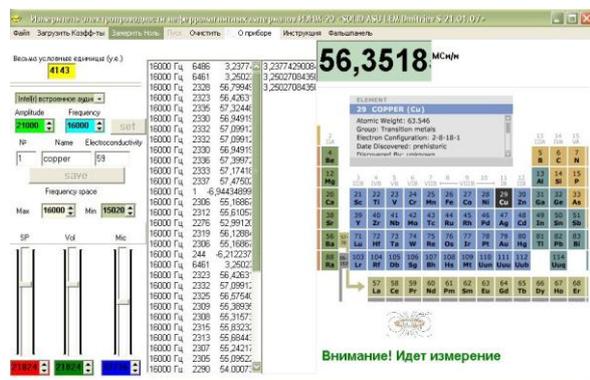


Рисунок 2 – Рабочая панель виртуального прибора ИЭНМ-10 с открытой панелью идентификации металла

Образцы двух- и трехкомпонентных составов с РЗМ (Ce) для исследований получали ампульным синтезом и методом СВС, смесей стехиометрических количеств чистых металлов (99,99 % основного вещества) в вакууме при остаточном давлении 0,04 атм. По окончании синтеза проводили контроль состава полученных сплавов титриметрическим определением содержания церия и рентгенофазовый анализ образцов для установления состава образующихся интерметаллидов (ДРОН-6, Со - K<sub>a</sub>).

По результатам рентгенофазового анализа в исследованных системах образуются интерметаллиды следующего состава: CeAl<sub>2</sub>, CeAl<sub>3</sub>, CeAl<sub>4</sub>, Ce<sub>3</sub>Al, CeGa<sub>2</sub>, CeGa<sub>6</sub>, Ce<sub>3</sub>Ga, CeIn<sub>2</sub>, CeIn<sub>3</sub>, Ce<sub>2</sub>In, GaMg<sub>6</sub>Ce<sub>3</sub>, Ga<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>Ce<sub>6</sub>, а также смеси указанных фаз.

У образцов монофазного состава были измерены значения удельного электрического сопротивления при 25 оС потенциометрическим методом и МВТ, результаты измеренных средних значений  $\rho_V$  приведены в таблице 1.

Из данных таблицы видно, что для сплавов двойных систем Ce-In наблюдается аномальное изменение электросопротивления с увеличением доли индия в интерметаллиде. Аналогичные изменения наблюдаются и в системах Ce с алюминием и галлием. Следует также отметить, что в области высоких концентраций церия в исследованных системах, трудно получить монофазные образцы, так как образующиеся интерметаллиды плавятся инконгруэнтно и в смеси можно обна-

ружить различные продукты их распада, а не только чистые металлы. Наоборот, в области высоких концентраций второго металла задаваемая при синтезе стехиометрия сохранялась. Такие же изменения характерны и для Ga и Al.

Таблица 1 – Удельное электросопротивление образцов

Состав	$\rho_V \times 10^8$ , Ом-см	Состав	$\rho_V \times 10^8$ , Ом-см
Ce	75,3	Ce <sub>3</sub> Al	221,7
Al	2,5	CeGa <sub>2</sub>	1188,5
Ga	53,4	Ce <sub>5</sub> Ga <sub>3</sub>	334,2
In	8,4	CeIn	117,8
CeAl	230,6	CeIn <sub>3</sub>	24,0
CeAl <sub>2</sub>	39,3	GaMg <sub>6</sub> Ce <sub>3</sub>	295,5
CeAl <sub>3</sub>	92,1	Ga <sub>2</sub> Mg <sub>3</sub> Ce <sub>6</sub>	357,2

В системе Ce-In минимальным сопротивлением обладает соединение CeIn<sub>3</sub> характеризующееся самым высоким отрицательным значением теплоты образования (-55,2 кДж/г-ат) и самой высокой температурой плавления (1753 K).

Зависимость параметра  $\rho_V$  от состава сплава позволяет использовать эту характеристику в физико-химическом анализе и контроле технологического процесса получения лигатуры, так как каждый из легирующих элементов сплава резко повышает его электропроводность [7]. Кроме того суммарная электропроводность состава с РЗМ является аддитивной величиной, поэтому измеряя этот параметр, после предварительной калибровки прибора ИЭНМ-10, можно определять долю конкретных интерметаллидов или продуктов их распада в образце.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спеченные материалы для электротехники и электроники. Справочник. / Гнесин Г.Г., Дубок В.А., Братерская Г. Н. и др. - М.: Металлургия, 1981.
2. Модификаторы и технологии внепечной обработки железоуглеродистых сплавов - М.: ЭКОМЕТ, 2008.
3. Дмитриев С.Ф., Панов С.Г., Ишков А.В. Виртуализированные приборы, использующие метод вихревых токов, для контроля параметров различных объектов и окружающей среды. // Ползуновский альманах. № 2. 2008. С.15-19.
4. Неразрушающий контроль металлов и изделий. / Под ред. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976.