

# ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОЕКЦИОННЫХ МЕТОДОВ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

© 2018 г. А.В. Егоров<sup>1</sup>, В.В. Поляков<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Алтайский государственный университет, 656049 Барнаул, пр. Ленина, 61

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055 Томск, Академический пр., 2/4

\*E-mail: pvv@asu.ru

Поступила в редакцию 06.06.2017

На примере немагнитных металлических материалов рассмотрено применение проекционных методов многомерного анализа данных к обработке измерений, получаемых при многочастотном вихретоковом контроле. На основе метода главных компонент было разделено влияние на результаты контроля таких факторов, как удельная электропроводность и величина зазора между датчиком и поверхностью материала. С помощью регрессии на главные компоненты были получены численные значения удельной электропроводности и величины зазора для магния, меди, бронзы, алюминия и алюминиевого сплава. Полученные результаты позволяют расширить возможности неразрушающей вихретоковой диагностики материалов.

*Ключевые слова:* метод вихревых токов, контроль материалов, многомерный анализ данных, метод главных компонент.

## ВВЕДЕНИЕ

Использование конструкционных материалов и изготовленных из них изделий в условиях с различными механическими и температурными воздействиями требует диагностики и контроля их структуры и физических характеристик. В связи с этим важной задачей является разработка новых и совершенствование имеющихся методов такой диагностики. В случае металлических материалов одним из наиболее распространенных методов неразрушающего контроля является метод вихревых токов [1], который позволяет выявлять различные виды дефектов структуры, прежде всего трещин [2, 3], определять их размеры и местоположение, оценивать значения различных физических характеристик [4], контролировать химический состав и проведенную термомеханическую обработку [5] и т.д. В то же время его существенным недостатком является то обстоятельство, что результат вихретоковых измерений определяется совместным действием большого числа конкурирующих факторов. К ним относятся: физические свойства материала (удельная электропроводность и магнитная проницаемость, зависящие от химического состава), особенности его структуры, вид и размеры дефектов, геометрические параметры конкретных образцов или изделий, параметры и режимы проводимых измерений, прежде всего частота возбуждаемых вихревых токов и величина зазора между датчиком и поверхностью контролируемого объекта, а также особенности конкретных измерительных устройств и параметры используемых датчиков. В зависимости от конкретной задачи, решаемой при вихретоковой диагностике, необходимо выделять влияние какого-либо одного фактора или группы таких факторов, все остальные относятся к числу мешающих и их влияние необходимо исключать.

Решение проблемы разделения факторов и выделения нужных для конкретной задачи параметров возможно с помощью различных подходов. Один из них заключается в создании специальных конструкций вихретоковых преобразователей и измерительных устройств, в которых чувствительность к контролируемому параметру является максимальной. Такой подход характеризуется повышенной сложностью в изготовлении измерительного датчика, при этом полностью исключить влияние мешающих факторов не удастся. Другой подход основывается на использовании теоретических зависимостей параметров измерительного датчика от характеристик контролируемого объекта [6, 7], которые следуют в конечном счете из решения системы уравнений Максвелла. Однако такие зависимости могут быть получены лишь для небольшого числа достаточно искусственных частных случаев.

В настоящей работе для разделения конкурирующих факторов, одновременно влияющих на результаты вихретоковых измерений, предлагается применять проекционные методы многомерного анализа данных, которые показали свою эффективность для широкого круга задач, связанных с выявлением скрытых закономерностей в условиях одновременного действия большого числа факторов [8, 9]. На примере немагнитных материалов с различными физическими свойствами описа-

но выделение отдельных факторов с помощью методов главных компонент, а также рассмотрена возможность предлагаемого подхода для количественной оценки этих факторов.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД И МАТЕРИАЛЫ

В вихретоковых методах, основанных на измерениях при одной фиксированной частоте, подавление мешающих факторов является крайне сложной задачей и, как правило, проводится путем трудоемкой процедуры подбора режима измерения. Наибольшая информативность вихретоковой диагностики достигается при использовании многочастотных измерений [10], результатом которых является получение экспериментальных годографов системы «датчик — контролируемый образец». Они строятся в широком диапазоне частот и отражают совместное влияние практически всех факторов, существенных для диагностики структуры и свойств материалов.

Контролируемые изделия могут иметь различные геометрические размеры и форму, что существенно сужает область применимости датчиков проходного типа в реальных производственных условиях. В силу этого все измерения проводились с помощью параметрического датчика накладного типа, который представлял из себя катушку индуктивности с сердечником, изготовленным из марганец-никелевого феррита с относительной начальной магнитной проницаемостью  $\mu = 2000$ , диаметр датчика составлял 20 мм. Вихретоковые измерения осуществлялись в интервале частот от 100 до 6400 Гц, обеспечивавшем надежное получение линий годографов. При использовании многочастотных измерений важной задачей является повышение точности определения параметров, снимаемых с датчика при различных частотах. В настоящей работе применялись многочастотные измерения, в которых уменьшение погрешности измерений достигалось за счет обработки получаемых сигналов функциями Уолша [4, 11].

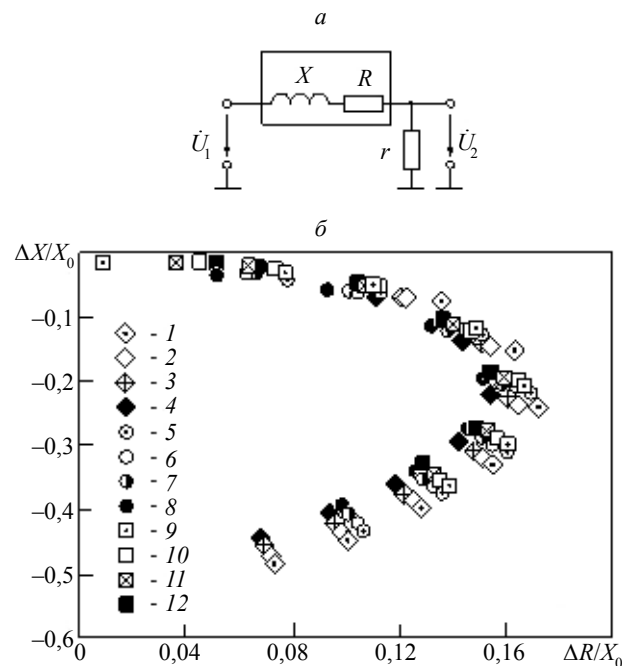


Рис. 1. Вихретоковые измерения для меди, магнезия и бронзы:

*a* — схема вихретоковых измерений; *b* — экспериментальные годографы системы «датчик — образец»; величина зазора *h*, медь: 1 — 0,07; 2 — 0,10; 3 — 0,14; 4 — 0,20; магнезий: 5 — 0,07, 6 — 0,10, 7 — 0,14, 8 — 0,20; бронза: 9 — 0,07, 10 — 0,1, 11 — 0,14, 12 — 0,20 мм.

Диагностика материалов проводилась с помощью автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса, обеспечивавшего определение импеданса индуктивного датчика [9]. Упрощенная схема измерений, использовавшаяся для определения импеданса, приведена на рис. 1*a*. Она включала в себя генератор, на выходе которого формировался синусоидальный сигнал с комплексной амплитудой

$$\dot{U}_1 = U_1 e^{j\omega t},$$

где  $U_1$  — амплитуда сигнала генератора;  $\varphi_1$  — его начальная фаза. Этот сигнал проходил через измерительную цепь, состоящую из измерительного датчика с реактивным сопротивлением  $X$  и активным сопротивлением  $R$ , а также резистора с сопротивлением  $r$ , который преобразовывал ток, протекавший в цепи, в переменное напряжение с комплексной амплитудой

$$\dot{U}_2 = U_2 e^{j\varphi_2},$$

где  $U_2$  — амплитуда сигнала;  $\varphi_2$  — его начальная фаза. Связь между комплексными амплитудами  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  задавалась соотношением

$$\dot{U}_2 = \frac{r}{r + R + jX} \dot{U}_1.$$

Приравнивая действительные и мнимые части этого равенства, получаем

$$\begin{cases} (r + R)U_2 = rU_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ XU_2 = rU_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \end{cases},$$

откуда соответственно следуют формулы для расчета реактивного  $X$  и активного  $R$  сопротивлений датчика:

$$X = r \frac{U_1}{U_2} \sin(\varphi_1 - \varphi_2),$$

$$R = r \left[ \frac{U_1}{U_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - 1 \right].$$

Результаты измерений представлялись в виде экспериментальных годографов, при этом по оси абсцисс графика откладывались относительные изменения активного сопротивления датчика  $\Delta R/X_0$ , а по оси ординат — относительные изменения реактивного сопротивления  $\Delta X/X_0$ . Здесь  $\Delta R = R - R_0$  — изменение активного сопротивления датчика при наличии образца;  $\Delta X = \omega(L - L_0)$  — изменение реактивного сопротивления датчика при наличии образца;  $X_0$ ,  $L_0$ ,  $R_0$  — активное сопротивление, индуктивность и реактивное сопротивление датчика без образца соответственно;  $\omega$  — циклическая частота входного синусоидального сигнала.

Вихретоковые испытания проводились для немагнитных металлических материалов с различающимися удельными электропроводностями  $\sigma$  для меди, магния, бронзы, алюминия и алюминиевого сплава. Образцы для испытаний представляли из себя плоские пластины размерами  $100 \times 100 \times 20$  мм. Геометрические размеры образцов исключали влияние краевых эффектов, толщина пластин превышала глубину скин-слоя, возникавшего при использованных частотах. Испытания для меди, магния и бронзы проводились для построения математических моделей и выявления особенностей предлагаемого подхода, алюминий и его сплав привлекались для апробации метода и исследования его возможностей.

Выделение одного из конкурирующих факторов и исключение других (мешающих) факторов проводились на примере удельной электропроводности и зазора между накладным датчиком и поверхностью образца. Величина зазора  $h$ , являющегося одним из основных мешающих факторов в реальных условиях, создавалась с помощью диэлектрических прокладок. Она изменялась в интервале от 0 до 1 мм. Удельные электропроводности  $\sigma$  исследовавшихся образцов измерялись четырехточечным методом и составляли  $57 \pm 5$  МС/м (медь),  $22 \pm 2$  (магний),  $8,5 \pm 0,8$  (бронза),  $34 \pm 4$  (алюминий),  $16 \pm 2$  (алюминиевый сплав D16T). Снимаемый с вихретокового преобразователя сигнал зависел одновременно от удельной электропроводности и от величины зазора, что позволяло выявить возможности предлагаемого метода по разделению конкурирующих факторов.

Результаты вихретоковых измерений в виде экспериментальных годографов в координатах  $\Delta R/X_0 - \Delta X/X_0$  приведены для меди, магния и бронзы на рис. 1б для четырех различных значений зазора  $h$ . Измерения осуществлялись на фиксированных частотах 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 Гц. Видно, что группы точек, описывавших различные материалы с разной удельной электропроводностью при одинаковом значении зазора, ложатся на одну и ту же кривую. Влияние удельной электропроводности проявлялось в том, что при ее увеличении происходил сдвиг эксперимен-

тальных точек из верхней части линии годографа, соответствовавшей низким частотам, в нижнюю часть, отвечающую высокой частоте. Такое поведение точек было обусловлено тем, что их положение на линии годографа при фиксированном значении зазора определялось только величиной обобщенного вихретокового параметра  $\beta$ , пропорционального произведению удельной электропроводности и частоты:  $\beta \sim \sqrt{\omega\sigma}$ . Линии годографа, полученные для одного и того же материала и различных значений зазора, сдвигались друг относительно друга. Этот сдвиг был заметнее в нижней части годографов, относившихся к области более высоких частот.

Расположение экспериментальных точек на рис. 1б в целом показывает, что разделить по виду годографов влияние отдельных факторов (в данном случае электропроводности и зазора) на измеряемые характеристики затруднительно, а произвести количественную оценку соответствующих параметров практически не представляется возможным. Это свидетельствует о необходимости разработки методов, которые могли бы обеспечить такие возможности для вихретоковых измерений.

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

Для разделения факторов, влияющих на результаты вихретоковых измерений, был применен метод главных компонент [8], согласно которому результаты всех измерений рассматривались как координаты точек многомерного пространства. Совокупность экспериментальных данных для конкретного образца формировал так называемый вектор признаков, задававший положение точки в многомерном пространстве. Точки, описывающие образцы с близкими характеристиками, располагались в одной области многомерного пространства вблизи друг от друга. Выявление скрытых закономерностей между результатами измерений достигалось путем перехода к новой ортогональной системе координат, которая строилась таким образом, что ее первая ось (главная компонента PC1) ориентировалась в направлении максимального разброса экспериментальных точек, вторая ось (главная компонента PC2), ортогональная первой, — в направлении разброса точек, следующего по величине, аналогично выбирались другие оси (главные компоненты PC3 и т.д.). Для графического представления и наглядного анализа результатов использовались проекции многомерных экспериментальных данных на плоскости первых главных компонент.

Обработка и анализ полученных экспериментальных годографов заключались в следующем. Для проведенных вихретоковых измерений вектор признаков характеризовал реакцию параметрического преобразователя (датчика) на контролируемый образец [12]. В качестве координат вектора признаков выступали относительные изменения активного  $\Delta R(\omega_n)/X_0(\omega_n)$  и реактивного  $\Delta X(\omega_n)/X_0(\omega_n)$  сопротивлений датчика при использовавшихся фиксированных частотах. Таким образом, каждый образец, характеризуемый конкретной величиной удельной электропроводности и заданным значением зазора, описывался одной точкой в  $2n$ -мерном пространстве, положение которой задавалось вектором признаков, содержащем координаты экспериментального годографа, построенного по  $n$  частотам (в нашем случае  $n = 7$ ). Непосредственные испытания проводились для групп образцов, каждая из которых включала в себя 10 образцов с одинаковыми значениями электропроводности и зазора. Полученные данные представлены на рис. 2 в виде графика проек-

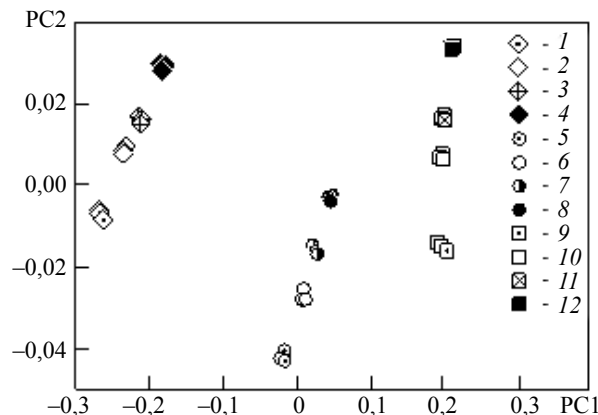


Рис. 2. Проекция результатов вихретоковых измерений на плоскость первых главных компонент. Величина зазора, медь: 1 — 0,07, 2 — 0,20, 3 — 0,50, 4 — 1,0; магний: 5 — 0,07, 6 — 0,2, 7 — 0,50, 8 — 1,0; бронза: 9 — 0,07, 10 — 0,20, 11 — 0,50, 12 — 1,0 мм.

ций на плоскость первых главных компонент PC1 и PC2. Видно, что точки, характеризовавшие измерения для одного и того же металла с разными значениями зазоров, разбились на обособленные группы, располагавшиеся вдоль отчетливо выделявшихся линий. Материалы с разными удельными электропроводностями описывались линиями, существенно разнесенными на плоскости первых главных компонент. Можно сказать, что на этих графиках ось PC1 отражала в первую очередь разделение материалов по физическим свойствам (по величине удельной электропроводности), а ось PC2 отвечала в основном за особенности режима измерений (за размер зазора между датчиком и поверхностью материала). Из анализа расположения точек на рис. 2 следует, что применение метода главных компонент обеспечило достаточно надежное разделение основных факторов, влияющих на результаты вихретоковых измерений.

### ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИИ НА ГЛАВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для количественного определения по экспериментальным годографам, находимым из вихретоковых измерений, значений удельной электропроводности и величины зазора применялся метод регрессии на главные компоненты [8]. Он используется в случаях, когда известна экспериментальная связь между вектором признаков и параметрами контролируемого объекта, влияющими на координаты данного вектора. В этом случае могут быть построены задающие такую связь математические модели. В методе регрессии на главные компоненты применяется двухэтапная процедура: на первом с помощью метода главных компонент создавалась новая ортогональная система координат по алгоритму, описанному в предыдущем разделе; на втором строилась линейная математическая модель, связывавшая параметры объекта контроля  $h$  и  $\sigma$  с координатами  $t_i$  в трансформированной на первом этапе системе координат:

$$h = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i t_i,$$

$$\sigma = b_0 + \sum_{i=1}^l b_i t_i.$$

Весовые коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  подбирались по наименьшему среднеквадратичному отклонению экспериментальных точек от результатов линейного моделирования. Следует отметить, что количество координат  $m$  и  $l$ , используемых при аппроксимации, как правило, меньше исходных. Это связано с тем, что увеличение номера координатной оси приводит к уменьшению влияния контролируемых параметров на соответствующую координату, которое становится соизмеримым с влиянием случайных факторов при измерении.

При построении регрессионной модели, предназначенной для определения величины зазора, использовались  $m = 3$ , при расчетах — значения  $h$ , определявшиеся из шести независимых измерений. Соответствующие экспериментальные данные составляли калибровочную выборку, а соотношения между векторами признаков и измерявшимися параметрами задавали калибровочную зависимость, которая далее использовалась для предсказания величины зазора по экспериментальным годографам. Результаты расчета по этой модели приведены на рис. 3. Теоретические значения представлены в виде прямой линии, измерения для трех металлов приведены в виде точек. Дисперсия значений  $h$ , изображаемая доверительным интервалом, описывала влияние удельной

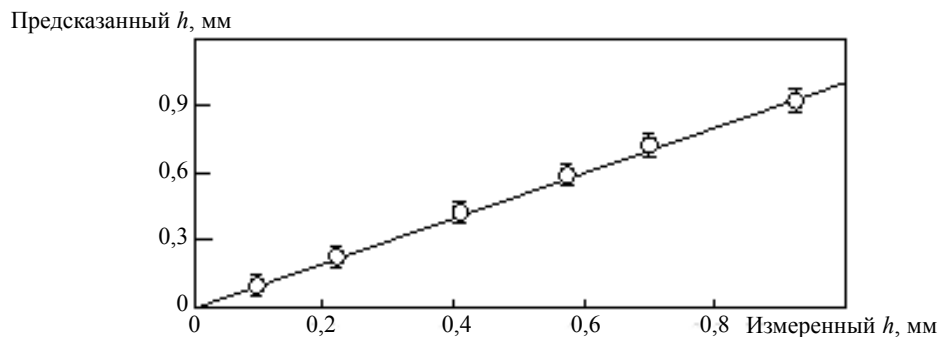


Рис. 3. Определение величины зазора.

электропроводности, выступавшей в данном случае в качестве мешающего фактора. Видно, что эта дисперсия весьма мала, то есть влияние удельной электропроводности незначительно.

Аналогично строилась вторая модель, призванная предсказывать величину удельной электропроводности, при этом в качестве измерявшихся параметров использовались определявшиеся из независимых измерений величины  $\sigma$  для меди, магния и бронзы. Соответствующая калибровочная зависимость для  $l = 5$  приведена на рис. 4а, где прямая линия изображает теоретические значения, а точки показывают экспериментальные данные для различных значений зазора. Разброс этих точек возле прямой линии, отображавший дисперсию значений удельной электропроводности, заметно больше, чем на рис. 3. Это означает, что влияние величины зазора (игравшего для второй модели роль мешающего фактора) довольно значительно.

Для улучшения второй модели была предложена ее модификация, заключающаяся в разбиении интервала зазоров на меньшие участки и последовательном получении для каждого из этих участков соответствующей калибровочной зависимости, при этом исходные годографы не изменялись. Было использовано пять интервалов равной длины: от 0 до 0,2 мм, от 0,2 до 0,4, от 0,4 до 0,6, от 0,6 до 0,8 и от 0,8 до 1,0. Результаты расчетов для пяти регрессионных моделей, строившихся независимо для каждого из пяти интервалов, приведены на рис. 4б, из которого видно, что удалось существенно снизить влияние зазора и уменьшить дисперсию значений удельной электропроводности.

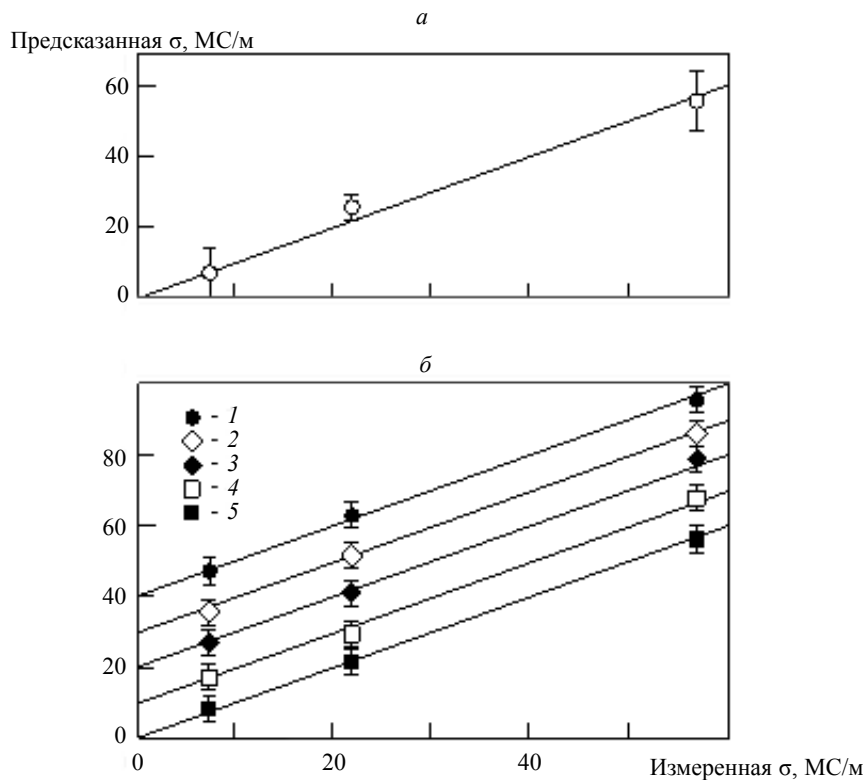


Рис. 4. Определение удельной электропроводности:

а — величина зазора от 0 до 1 мм; б — величина зазора: 1 — от 0 до 0,2 (предсказанное значение  $\sigma+40$  МС/м), 2 — от 0,2 до 0,4 ( $\sigma+30$  МС/м), 3 — от 0,4 до 0,6 ( $\sigma+20$  МС/м), 4 — от 0,6 до 0,8 ( $\sigma+10$  МС/м), 5 — от 0,8 до 1,0 мм.

Таким образом, предложенный подход к обработке результатов многочастотного вихретокового контроля использует алгоритм, включающий в себя следующую последовательность действий.

1. Для специально подготовленных образцов с известными величинами удельных электропроводностей и зазоров проводятся вихретоковые измерения, на основе которых составляется калибровочная таблица, содержащая следующие данные: удельные электропроводности  $\sigma$ , толщины зазоров (задаваемые диэлектрическими прокладками)  $h$ , экспериментальные значения  $\Delta R(\omega_n)/X_0(\omega_n)$  и  $\Delta X(\omega_n)/X_0(\omega_n)$  для набора фиксированных частот.

2. Данные полученной таблицы обрабатываются по итерационному алгоритму метода главных компонент [8], с помощью которого массив экспериментальных данных переводится к новой системе координат, обеспечивающей возможность разделения влияющих факторов, в данном

случае — удельных электропроводностей и зазоров. Результат такого разделения может быть наглядно представлен в виде графика проекций на выделенные оси координат (см. рис. 2).

3. Строятся регрессионные модели для величин зазоров и удельных электропроводностей, с помощью которых выявляется разброс предсказываемых значений, влияющих на погрешность определения вычисляемых характеристик.

4. Для контролируемых изделий проводятся измерения на том же наборе частот, для которого строилась калибровочная таблица. С помощью полученных на предыдущем этапе регрессионных моделей рассчитываются неизвестные значения толщин  $h$  и удельных электропроводностей  $\sigma$ .

### РАСЧЕТ ЗНАЧЕНИЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ НЕМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Построенные в предыдущем разделе калибровочные модели были использованы для количественного определения величин зазора и удельной электропроводности образцов, изготовленных из тех же металлов (меди, магния и бронзы) и с величинами зазоров, не применявшимися при калибровке, то есть выступавших в роли тестовых образцов с «неизвестными» значениями  $h$  и  $\sigma$ . Данные, полученные на основе построенных регрессионных моделей, сопоставлялись с независимыми измерениями  $h$  и  $\sigma$  и приведены в табл. 1, из которой видно, что рассчитанные величины зазора и удельной электропроводности с точностью до погрешности измерений совпадают с измеренными значениями.

Таблица 1

Контролируемые характеристики для меди, магния и бронзы

Материал	$h$ , мм		$\sigma$ , МС/м	
	измеренное	рассчитанное	измеренное	рассчитанное
Медь	$0,14 \pm 0,05$	0,13	$57 \pm 6$	57,1
	$0,30 \pm 0,05$	0,31		58,45
	$0,50 \pm 0,05$	0,50		57,3
	$1,0 \pm 0,1$	0,99		55,3
Магний	$0,14 \pm 0,05$	0,12	$22 \pm 2$	22,3
	$0,30 \pm 0,05$	0,29		22,6
	$0,50 \pm 0,05$	0,52		22,0 5
	$1,0 \pm 0,1$	0,98		24,3
Бронза	$0,14 \pm 0,05$	0,10	$8,5 \pm 0,8$	7,8
	$0,30 \pm 0,05$	0,31		8,8
	$0,50 \pm 0,05$	0,53		7,9
	$1,0 \pm 0,1$	0,99		8,6

Таблица 2

Контролируемые характеристики для материалов на основе алюминия

Материал	$h$ , мм		$\sigma$ , МС/м	
	измеренное	рассчитанное	измеренное	рассчитанное
Алюминий	$0,14 \pm 0,05$	0,11	$34 \pm 4$	34,3
	$0,30 \pm 0,05$	0,32		35,0
	$0,50 \pm 0,05$	0,51		35,6
	$1,0 \pm 0,1$	0,97		34,8
Сплав D16T	$0,14 \pm 0,05$	0,09	$16 \pm 2$	15,2
	$0,30 \pm 0,05$	0,28		16,5
	$0,50 \pm 0,05$	0,48		14,8
	$1,0 \pm 0,1$	0,98		17,7

Описанный подход был дополнительно применен к материалам, не участвовавшим в построении моделей и обладавшим существенно отличающимися удельными электропроводностями, а именно к алюминию и алюминиевому сплаву D16T. Это обеспечило более надежную апробацию как построенных калибровочных моделей, так и самого применявшегося метода. Предсказанные и измеренные значения  $h$  и  $\sigma$  для образцов алюминия и сплава D16T приведены в табл. 2. Сопоставление этих значений также свидетельствует о достаточно высокой точности, достигаемой при определении контролируемых характеристик.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов показывает, что метод главных компонент обеспечил надежное разделение конкурирующих факторов, влияющих на результаты вихретоковой диагностики. Это может быть использовано, например, при разбраковке образцов материалов с неустановленным химическим составом без проведения трудоемких операций химического анализа, при выявлении влияния предшествующей термической или механической обработки, при классификации материалов по их свойствам и в других подобных задачах. Применение регрессии на главные компоненты предоставило возможность количественно и с достаточно высокой точностью определить по результатам вихретоковых измерений значения контролируемых характеристик. Построенные в рамках предложенного подхода математические модели важны при разработке новых методик вихретокового контроля структуры и состава материалов и изделий. Они могут быть успешно использованы в задаче неразрушающих измерений толщины диэлектрического покрытия на металлах произвольного и заранее неизвестного состава.

Таким образом, применение проекционных методов многомерного анализа к результатам вихретоковых измерений позволяет существенно расширить возможности неразрушающей вихретоковой диагностики.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00914.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль. Справочник. В 7 т. Под общ. ред. Клюева В.В. Т. 2. М.: Машиностроение, 2003. 688 с.
2. *Garcia-Martin J., Gomez-Gil J., Vazquez-Sanchez E.* Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing // *Sensors* (Basel). 2011. V. 11(3). P. 2525—2565.
3. *Yang H.C., Tai C.C.* Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate // *Measurement Science and Technology*, 2002. V. 13. P. 1259—1265.
4. *Egorov A.V., Polyakov V.V., Salita D.S.* and et al. Inspection of aluminum alloys by a multi-frequency eddy current method // *Defence Technology*. 2015. V. 11. P. 99—103.
5. *Бакунов А.С., Мужичицкий В.Ф., Шубочкин С.Е.* Современное решение задач вихретоковой структуроскопии // *Дефектоскопия*. 2004. № 5. С. 79—84.
6. *Якимов Е.В., Уразбеков Е.И., Гольдштейн А.Е., Булгаков В.Ф.* Вычислительное преобразование сигналов измерительной информации системы вихретоковой дефектоскопии // *Дефектоскопия*. 2013. № 11. С. 59—66.
7. *Дякин В.В., Сандовский В.А.* Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. М.: Наука, 1981. 136 с.
8. *Эсбенсен К.* Анализ многомерных данных. Избранные главы. Пер. с англ. С.В. Кучерявского. Черноголовка: Изд-во ИПХФ РАН, 2005. 157 с.
9. *Егоров А.В., Поляков В.В.* Применение метода главных компонент при вихретоковом контроле алюминиевых сплавов // *Дефектоскопия*. 2015. № 10. С. 42—48.
10. *Shokralla S., Morelli J.E., Krause T.W.* Principal Components Analysis of Multifrequency Eddy Current Data Used to Measure Pressure Tube to Calandria Tube Gap // *IEEE Sensors J.* 2016. V. 16. № 9. P. 3147—3154.
11. *Залманзон Л.А.* Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. М.: Наука, 1989. 496 с.
12. *Egorov A.V., Kucheryavskiy S.V., Polyakov V.V.* Resolution of effects in multi-frequency eddy current data for reliable diagnostics of conductive materials // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2017. V. 160. P. 8—12.