

Применение метода главных компонент при вихретоковом контроле металлических материалов с диэлектрическими покрытиями*

A.V. Egorov¹, V.V. Polyakov^{1,2}, J.I. Gracheva¹, S.V. Kucheryavskiy³

¹ Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия)

³ Ольборгский университет (Эсбьерг, Дания)

Application of Principal Component Analysis for Eddy Current Testing of Metal Materials with Applied Dielectric Layers

A.V. Egorov¹, V.V. Polyakov^{1,2}, J.I. Gracheva¹, S.V. Kucheryavskiy³

¹ Altai State University (Barnaul, Russia)

² Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS (Tomsk, Russia)

³ Aalborg University (Esbjerg, Denmark)

Рассмотрены возможности многочастотных вихретоковых измерений для проведения неразрушающего контроля геометрических характеристик металлических материалов. С целью расширения таких возможностей экспериментальные годографы для образцов, представлявших собой медные пластины различной толщины с нанесенными диэлектрическими покрытиями, были подвергнуты обработке с помощью проекционных методов многомерного анализа данных. Применение метода главных компонент обеспечило достаточно надежное разделение влияющих на контролируемые параметр конкурирующих факторов — толщин металлической пластины и диэлектрического слоя. Использование метода регрессии на главные компоненты дало возможность построить математические модели, позволившие по экспериментальным годографам с достаточно высокой точностью определить по результатам одного измерения толщину диэлектрического покрытия и в случае относительно тонких образцов толщину металлического листа. Полученные результаты расширяют возможности вихретокового контроля металлических материалов и могут быть применены при неразрушающей диагностике изготовленных из них изделий и конструкций.

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

In the paper, the potentials of multi-frequency eddy current measurements for non-destructive testing of geometric characteristics of metallic materials are considered. To enhance such potentials, experimental hodographs for copper plate testing samples of various thicknesses with applied dielectric layer are processed by projection methods of multidimensional data analysis. Application of principal component analysis ensures a sufficiently reliable separation of competing factors that affect the controlled parameter—the thicknesses of a metal plate and a dielectric layer. Principal components regression allows for the development of mathematical models for highly accurate evaluation of dielectric layer thickness and thickness of a metal plate for relatively thin samples. Obtained results significantly enhance the potentials of eddy current testing of metallic materials and can be used for nondestructive diagnostics of products and structures made of them.

Key words: eddy current method, testing of materials, aluminum alloys, multivariate data analysis, principal component analysis.

DOI 10.14258/izvasu(2017)4-05

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

Введение. Широкое использование изделий и конструкций из металлических материалов с нанесенными упрочняющими и защитными покрытиями предъявляет повышенные требования к контролю их основных характеристик, существенных для эксплуатации в условиях внешних механических и температурных воздействий. К числу таких характеристик относятся геометрические параметры металлической основы и толщина нанесенного покрытия. Одним из наиболее эффективных и распространенных методов неразрушающего контроля металлических материалов является метод вихревых токов [1–4]. В то же время существенным недостатком этого метода является то обстоятельство, что разделить контролируемые характеристики, одновременно влияющие на результаты вихретоковых измерений, достаточно сложно. Кроме того, дополнительные трудности создает воздействие на результаты контроля совместного действия конкурирующих факторов, обусловленных электрическими и магнитными свойствами материала, особенностями структуры и ее дефектами, геометрическими параметрами контролируемого объекта, режимами измерений, а также особенностями используемых измерительных устройств. Для повышения надежности вихретокового контроля приходится исключать мешающие факторы и разделять воздействие, оказываемое контролируруемыми характеристиками. Необходимо отметить, что подходы, заключавшиеся в совершенствовании конструкций измерительного устройства, в значительной степени исчерпали свои возможности, поскольку они не позволили полностью подавить мешающие факторы и не обеспечили надежное разделение контролируемых параметров при их контроле [1, 5].

Одним из новых и перспективных подходов к решению рассматриваемой задачи является обработка результатов измерений с помощью методов многомерного анализа, позволяющая выделить скрытые закономерности в больших массивах экспериментальных данных [6–10]. В настоящей работе такой подход, заключающийся в обработке полученных при контроле характеристик с помощью метода главных компонент и последующей регрессии на главные компоненты, рассмотрен на примере образцов из меди различной толщины с нанесенными слоями диэлектрика.

1. Применение метода главных компонент для разделения контролируемых характеристик. В качестве объектов контроля в настоящей работе использовались образцы листовой меди с диэлектрическим покрытием. Контролируемыми характеристиками являлись толщины металлической пластины h и покрытия s . Экспериментальные годографы были построены и проанализированы в широком диапазоне частот в работе [11]. Как следует из вида и расположения линий годографов, при одновременном изменении величин h и s эти линии

перекрывались, т.е. контролировать толщины весьма затруднительно. Это непосредственно свидетельствует о необходимости разработки новых методов обработки информативных сигналов, которые могли бы обеспечить такой контроль.

Для разделения факторов, влияющих на результаты многочастотных вихретоковых измерений, в работе был применен метод главных компонент [10, 12, 13]. Согласно этому методу, результаты измерений активного и реактивного сопротивлений датчика, формировавшие годограф, рассматривались как координаты точки многомерного пространства. Выявление латентных закономерностей достигалось путем перехода к новой системе координат, обеспечивавшей уменьшение размерности этого пространства. В такой системе координат первая ось (главная компонента PC1) ориентировалась в направлении максимального разброса экспериментальных точек, вторая ось (главная компонента PC2) — в направлении разброса, следующего по величине, и т.д. Каждый образец, характеризуемый конкретными значениями толщин металлической основы и покрытия, описывался одной точкой в $2n$ -мерном пространстве, где n — число частот, по которым строился годограф. Полученные результаты представлялись в виде проекций на плоскости главных компонент. На этих проекциях точки, описывавшие образцы с близкими характеристиками, располагались вблизи друг от друга, образуя кластеры.

Типичные результаты расчетов по методу главных компонент представлены на примере трех разных значений толщины покрытия и пяти различных толщин металлической пластины (рис. 1а). Как видно из данного рисунка, образцы с одинаковыми значениями h и s образовывали кластеры из близко расположенных точек. Незначительные расхождения в расположении этих точек внутри кластера связаны с погрешностью измерений. Кластеры, характеризовавшие образцы разной толщины h с одной и той же толщиной диэлектрического покрытия s , разбились на обособленные группы, которые располагались вдоль отчетливо выделявшихся линий, нанесенных на плоскости первых главных компонент вдоль оси PC1. Можно сказать, что ось PC1 отражала в первую очередь разделение образцов по величине покрытия. Кластеры, соответствовавшие измерениям с разными значениями h при одном и том же s , с ростом толщины металлической пластины сближаются и перекрываются при больших h . Это отражает низкую различимость толщин, существенно превышавших глубину скин-слоя. Такое расположение точек позволяет считать, что ось PC2 отвечала в основном за толщину металлической пластины. В целом из анализа рисунка 1а видно, что применение метода главных компонент позволило наглядно разделить контролируемые факторы.

Отметим, что результаты контроля металлических пластин с большой толщиной могут быть улучшены, если описанный алгоритм обработки будет применен для меньшего интервала значений h . Для иллюстрации (рис. 1б) приведены результаты расчетов для интервала толщин от 5 до 21 мм. Видно, что группы точек, сформировавшие общий кластер на рисунке 1а, разделились на отдельные кластеры.

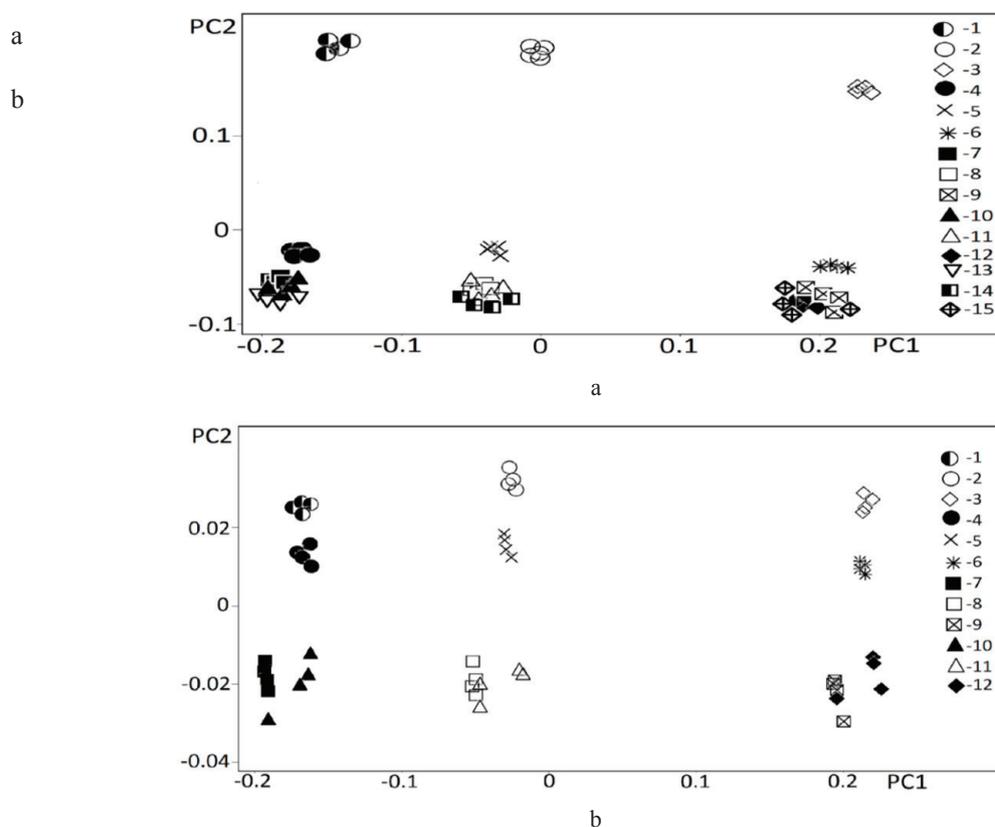


Рис. 1. Проекция экспериментальных данных на плоскость первых главных компонент:

а) значения h при $s = 0$: 1 — 1.87 мм, 4 — 5.59, 7 — 7 мм, 10 — 19.5 мм, 13 — 21.3 мм; при $s = 0.2$ мм: h : 2 — 1.87 мм, 5 — 5.59 мм, 8 — 7.52 мм, 11 — 19.5 мм, 14 — 21.3 мм; при $s = 0.6$ мм: 3 — 1.87 мм, 6 — 5.59 мм, 9 — 7.52 мм, 12 — 19.5 мм, 15 — 21.3 мм.; б) уменьшенный интервал толщины медной пластины, значения h при $s = 0$: 1 — 5.59 мм, 4 — 7.52 мм, 7 — 19.5 мм, 10 — 21.3 мм; при $s = 0.2$ мм: 2 — 5.59 мм, 5 — 7.52 мм, 8 — 19.5 мм, 11 — 21.3 мм; при $s = 0.6$ мм: 3 — 5.59 мм, 6 — 7.52 мм, 9 — 19.5 мм, 12 — 21.3 мм

2. Количественное определение контролируемых характеристик.

Неразрушающий контроль геометрических характеристик структурных элементов композиционных материалов и изготовленных из них изделий является одной из наиболее сложных задач вихретоковой диагностики. Для количественного контроля толщин металлической пластины и диэлектрического покрытия в настоящей работе был применен метод регрессии на главные компоненты [6]. Этот метод используется, если известна экспериментальная связь между совокупностью экспериментальных данных, задававших координаты соответствующих точек в многомерном пространстве, и характеристиками контролируемого объекта. В таком случае можно построить математическую модель, описывающую эту связь в системе главных координат. Линейные математические модели, связывавшие контролируемые параметры s и h с координатами t_i , могут быть записаны в следующем виде:

$$h = \sum_{i=1}^l a_i t_i, \quad s = \sum_{i=1}^m b_i t_i.$$

Коэффициенты a_i и b_i находятся по наименьшему среднеквадратичному отклонению экспериментальных точек от результатов линейного моделирования.

Число координат l или m , используемое при моделировании, оказывается меньше исходного, поскольку при увеличении номера координатной оси уменьшается влияние контролируемой характеристики. При расчетах это число определялось по наименьшему разбросу δ значений, предсказываемых моделью. На рисунке 2 приведены зависимости δ от числа компонент для контролируемых характеристик. Из данного рисунка следует, что наименьший разброс δ_l при моделировании толщины металлической пластины достигается при $l=10$, а наименьший разброс δ_m — при моделировании толщины покрытия $m = 7$.

При построении моделей использовались независимые измерения, составлявшие калибровочную выборку. По этим измерениям строились калибровочные зависимости, которые применялись далее для предсказания значений контролируемых характеристик по экспериментальным годографам. Результаты расчета толщины покрытия s приведены на рисунке 3. Теоретические значения представлены в виде прямой линии, вертикальными отрезками показан разброс экспериментальных точек. Изображаемая этим разбросом дисперсия значений s характеризует влияние толщины металлической пластины, игравшей в данном случае роль мешающего фактора. Из рисунка 3 видно, что эта дисперсия относительно мала, т.е. влияние мешающих факторов незначительно.

Аналогичные результаты для определения толщины медной пластины приведены на рисунке 4а. Здесь вертикальные отрезки, располагающиеся возле теоретической прямой, изображают разброс значений h при различной толщине покрытий. Из рисунка 4а следует, что этот разброс увеличивается с ростом толщины пластины, т.е. используемая математическая модель приводит к большей погрешности при определении величины h . В связи с этим была применена модификация модели, заключающаяся в разбиении диапазона толщин на два интервала — малых и больших значений h . Регрессионные зависимости строились независимо для каждого из этих интервалов. Результаты расчетов, приведенные на рисунках 4b и 4с, показывают, что в этом случае влияние мешающих факторов уменьшается.

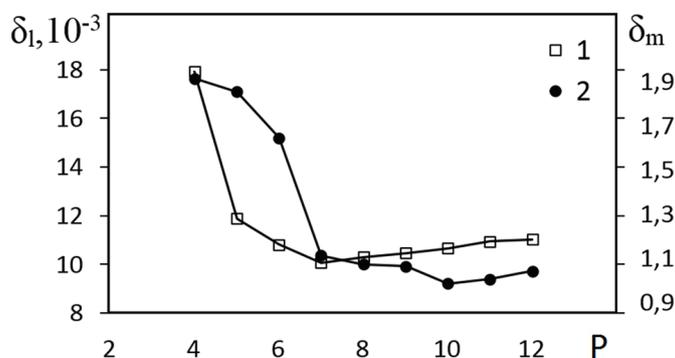


Рис. 2. Определение числа компонент регрессионной модели для медных образцов с диэлектрическим покрытием:
1 — толщина покрытия, 2 — толщина пластины

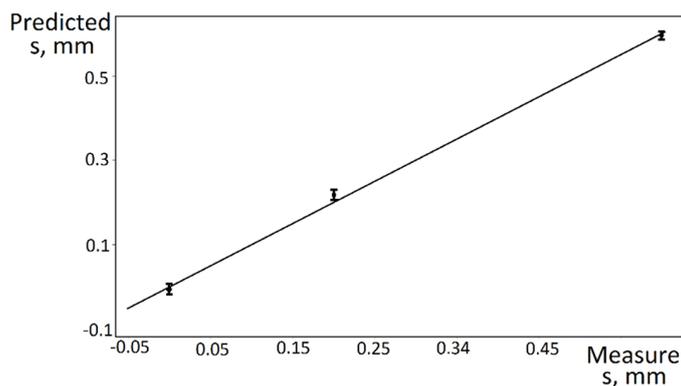
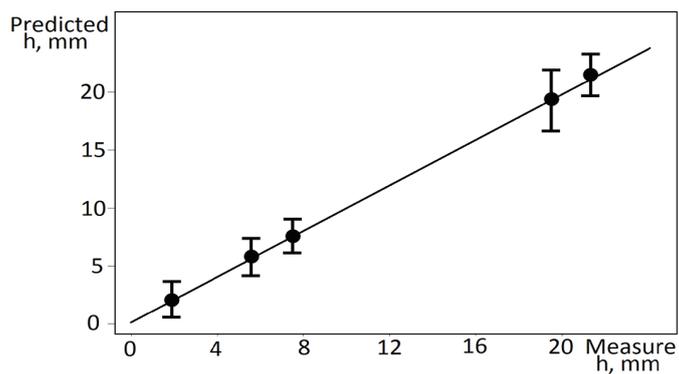


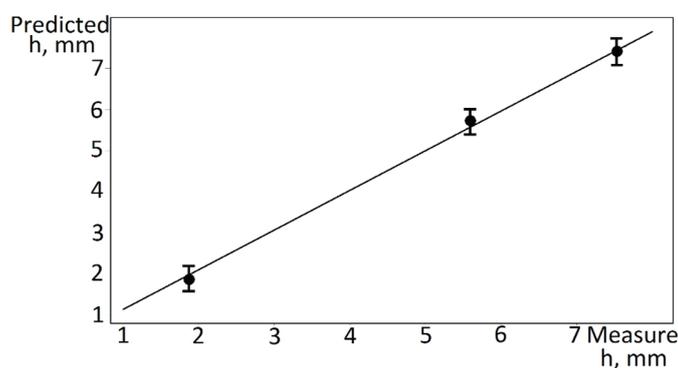
Рис. 3. Определение толщины диэлектрического покрытия

Регрессионные модели, построенные по калибровочным выборкам, были использованы для определения величин h и s образцов, не участвовавших в калибровке, т.е. выступавших в роли тестовых образцов с «неизвестными» значениями толщин пла-

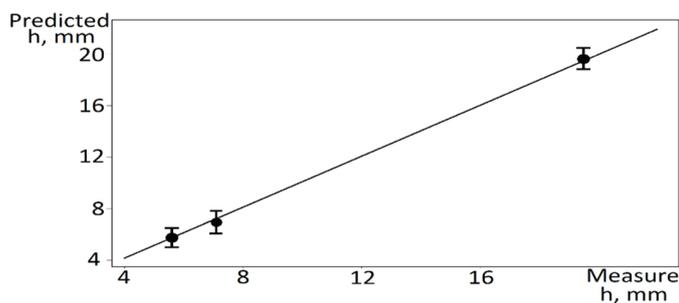
стины и покрытия. Типичные результаты расчетов в сопоставлении с непосредственными измерениями h и s приведены в таблице. Как следует из таблицы, рассчитанные значения отличаются от измеренных не более чем на 5%.



a



b



c

Рис. 4. Определение толщины металлической пластины:
 а — диапазон толщин h от 1.8 до 21 мм, б — от 1.8 до 7.5 мм, с — от 5.5 до 19 мм

Характеристики медных образцов с диэлектрическим покрытием

h, mm		s, mm	
Измеренное	Рассчитанное	Измеренное	Рассчитанное
3.73 ± 0.05	3.89	0.4 ± 0.05	0.410
7.52 ± 0.05	8.14		

Заключение. Анализ приведенных результатов показывает, что обработка данных вихретоковых измерений с помощью методов главных компонент и ре-

грессий на главные компоненты позволяет расширить возможности неразрушающего вихретокового контроля металлических материалов. Предложенный под-

ход обеспечивает достаточно надежное определение таких характеристик, как толщины металлических образцов и нанесенных на них диэлектрических покрытий. Это может быть использовано при проведении одновременного контроля указанных параметров

для различных материалов и изготовленных из них конструкций. Построенные регрессионные математические модели могут быть применены в задачах неразрушающей диагностики структуры металлических материалов и изделий.

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль : в 7 т / под общ. ред. В.В. Клюева. — М., 2003. — Т. 2.
2. Garcia-Martin J., Gomez-Gil J., and Vazquez-Sanchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing // *Sensors (Basel)*. — 2011. — Vol. 11(3).
3. Sasi B., Rao B.P.C., Jayakumar T. and Raj Baldev. Development of Eddy Current Test Procedure for Non-destructive Detection of Fatigue Cracks and Corrosion in Rivets of Air-intake Structures // *Defence Science Journal*. 2009. — Vol. 59, No. 2.
4. Крайний В.И., Будагин О.Н., Троицкий-Марков Т.Е. Повышение надежности обнаружения дефектов сложных конструкций с помощью комплексирования информации многопараметрового неразрушающего контроля // *Дефектоскопия*. — 2012. — № 2.
5. Бакунов А.С., Мужичкий В.Ф., Шубочкин С.Е. Современное решение задач вихретоковой структуроскопии // *Дефектоскопия*. — 2004. — №5.
6. Esbensen K.H. *Multivariate Data Analysis — In Practice*. — Oslo, 2002.
7. Max J. *Methodes es techniques de traitement du Signal et applications aux mesures physiques*. Tome 2, 4e ed. — Paris, 1987.
8. 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. — Vol. 160.
9. 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. — Vol. 16, №9.
10. Егоров А.В., Поляков В.В. Применение метода главных компонент при вихретоковом контроле алюминиевых сплавов // *Дефектоскопия*. — 2015. — №10.
11. Грачева Я.И., Егоров А.В., Поляков В.В. Автоматизированный вычислительно-измерительный комплекс для многочастотной вихретоковой диагностики металлических материалов // *Известия Алтайского гос. ун-та*. — 2017. — № 4. DOI:10.14258/izvasu(2017)4-6.
12. Sophian A., Tia G.Y., Taylor D., Rudlin J. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed Eddy current NDT // *NDT E International*. — 2003. — № 36.
13. BinFeng Y., FeiLu L., Dan H. Research on edge identification of a defect using pulsed eddy current based on principal component analysis // *NDT E Internationa*. — 2007. — №.40.