

УДК 539.42

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ К ВИХРЕТОКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ДЛЯ СТАЛЕЙ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ**А.В. Егоров¹, В.В. Поляков^{1,2†}, С.В. Кучерявский³**

†pvv@asu.ru

¹Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, 656049, Барнаул, Россия²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, 634055, Томск, Россия³Университет Ольборга, Нильс Борс Вей 8, 6700, Эсбьерг, Дания

Проведены многочастотные вихретоковые измерения для образцов магнитных сталей с диэлектрическими покрытиями. Покрытия моделировались диэлектрическими прокладками, толщина h которых задавалась в диапазоне от $h = 0$ (накладной датчик непосредственно соприкасался с проводящей поверхностью) до $h = 1,5$ мм. Вихретоковые измерения для системы «накладной параметрический датчик - исследуемый образец» проводились по экспериментальной методике, при которой возбуждающий сигнал содержал специально подобранный набор гармоник с фиксированными частотами. Осуществлены расчеты годографов, позволившие исследовать совместное влияние на экспериментальные годографы таких факторов, как величина магнитной проницаемости и толщина диэлектрического слоя между поверхностью материала и датчиком. Для разделения влияющих факторов был использован математический аппарат метода главных компонент. При обработке экспериментальных данных применялась методика кластеризации, ранее апробированная для немагнитных металлических материалов и металлических сплавов со слабыми магнитными свойствами. В результате расчетов было проведено разделение на кластеры многочастотных вихретоковых данных для исследованных сталей с разными магнитными и электрическими характеристиками, при этом достигалось линейное разделение кластеров, относящихся к образцам с одинаковыми значениями толщин диэлектрического покрытия. Предложенный подход к математической обработке результатов вихретоковых измерений может быть применен при проведении неразрушающей вихретоковой диагностики изделий из магнитных сталей с нанесенными защитными и упрочняющими диэлектрическими покрытиями.

Ключевые слова: вихретоковый метод, магнитные свойства, сталь, диагностика материалов, метод главных компонент.

APPLICATION OF PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS TO EDDY CURRENT TESTING FOR STEELS WITH DIELECTRIC COATINGS**A.V. Egorov¹, V.V. Polyakov^{1,2†}, S.V. Kucheryavskiy³**

†pvv@asu.ru

¹Altai State University, Lenin Pr., 61, Barnaul, 656049, Russia²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Akademicheskij Pr., 2/4, Tomsk, 634055, Russia³Aalborg University, Niels Bohrs Vej 8, 6700, Esbjerg, Denmark

Multifrequency eddy current measurements were carried out for samples of magnetic steels with dielectric coatings. In the tests used, the coatings were modeled by dielectric spacers, the thickness h of which was set in the range from $h = 0$ (the patch sensor was directly in contact with the conductive surface) to $h = 1.5$ mm. Eddy-current measurements for the “invoice parametric sensor - test sample” system were carried out according to an experimental method in which the exciting signal contained a specially selected set of harmonics with fixed frequencies. Hodographs were calculated, which made it possible to study the combined effect of such factors as the magnetic permeability and the thickness of the dielectric layer between the material surface and the sensor on the experimental hodographs. To separate the influencing factors, the mathematical apparatus of the principal component method was used. The experimental data were processed using the clustering technique previously tested for non-magnetic metallic materials and metallic alloys with weak magnetic properties. As a result of the calculations, the multi-frequency eddy current data were divided into clusters for the studied steels with different magnetic and electrical characteristics, while a linear separation of the clusters belonging to samples with the same dielectric coating thicknesses was achieved. The proposed approach to the mathematical processing of eddy current measurements can be applied when conducting non-destructive eddy current diagnostics of products made of magnetic steels with protective and reinforcing dielectric coatings applied.

Keywords: eddy current method, magnetic properties, steel, materials diagnostics, principal component method.

Введение

Одними из наиболее распространенных конструкционных материалов являются стали различного состава, характеризующиеся широким спектром механических и физических характеристик. Для повышения качества стальных изделий применяются защитные и упрочняющие покрытия разных видов, в том числе с диэлектрическими свойствами. В частности, такие покрытия нашли широкое распространение в авто- и авиастроении. Использование стальных изделий с диэлектрическими покрытиями при разнообразных эксплуатационных условиях определяет важность диагностики и контроля этих материалов и изготовленных из них конструкций. Важнейшими методами неразрушающей диагностики этих изделий выступают акустические и вихретоковые методы [1-4]. Они позволяют как выявлять дефекты строения [5-9] и оценивать физические характеристики материала [10-13], так и определять толщину металлической подложки и нанесенного покрытия [14, 15]. Однако ультразвуковые измерения обладают таким недостатком, как низкая точность в случае малых толщин диагностируемых объектов. В этих случаях рядом преимуществ обладает вихретоковая диагностика [16]. В то же время существенные трудности вызывает то обстоятельство, что на результат этих измерений одновременно влияет большое число физических факторов, характеризующих электрические и магнитные свойства материала, геометрических факторов, связанных с размерами и формой контролируемых изделий, и факторов, связанных с особенностями измерительного устройства (прежде всего конструкцией вихретокового датчика) и с режимом измерений [17-21].

В случае сталей среди влияющих факторов необходимо особо выделить магнитные свойства. Количественно они характеризуются величиной относительной магнитной проницаемости μ , которая достаточно велика (может достигать значений $\sim 10^3$ - 10^4) и в силу этого оказывает доминирующее влияние на измеряемые характеристики системы «вихретоковой датчик - диагностируемый объект». Кроме того, магнитная проницаемость сталей варьируется в весьма широких пределах, ее значения зависят от химического состава стали и при изменении этого состава за счет различных легирующих добавок претерпевают значительные измене-

ния, превосходящие относительно небольшие изменения удельной электропроводности. Как следствие, достаточно малые и, как правило, неконтролируемые изменения в химическом составе стали могут существенно сказываться на измеряемых вихретоковых параметрах. В сочетании с одновременным конкурирующим влиянием электрических свойств и геометрических характеристик (размера стальной подложки, толщины диэлектрического покрытия и т.д.) это приводит к тому, что разделить влияющие факторы и выделить диагностируемую характеристику весьма затруднительно.

Перспективным подходом, обеспечивающим разделение влияющих факторов, является обработка результатов вихретоковых измерений на основе математического аппарата многомерного анализа [22-25]. Этот подход был успешно применен к немагнитным металлическим материалам (в частности, к алюминиевым и медным сплавам различного состава) [26, 27], а также к металлическим материалам со слабыми магнитными свойствами (в частности, к магнитным бронзам) [28]. Для этих материалов с помощью метода главных компонент [29] по результатам вихретоковых измерений были проведены оценки толщин металлических пластин и нанесенных на них диэлектрических покрытий. В настоящей работе данный подход применяется к вихретоковым измерениям для сталей различного состава.

1. Материалы и метод измерений

Измерения проводились для образцов стали двух широко распространенных марок – конструкционной углеродистой стали Ст3 и инструментальной легированной стали 9ХС. Образцы из стали Ст3 содержали порядка 0,2% углерода, десятые доли процента добавки кремния, марганца, никеля, хрома, меди, в совокупности легирующие добавки составляли до 3% состава материала. Химический состав образцов из стали 9ХС включал в себя около 1% углерода, порядка одного процента хрома и кремния, а также другие элементы, в совокупности легирующие добавки составляли до 6% состава стали.

Образцы для измерений изготавливались из листов стали толщиной $d = 10$ мм, пластины имели размер не менее 100×100 мм для исключения краевых эффектов. Величина диэлектрического покрытия h моделировалась диэлек-

трическими прокладками и изменялась в интервале от $h = 0$ до $h = 1,5$ мм.

Удельная электрическая проводимость σ образцов определялась по четырехточечному методу. Для измерения магнитной проницаемости μ применялся баллистический метод (напряженность намагничивающего поля равнялась 10А/м). Полученные значения составляли $\sigma = 6,4$ МСм/м, $\mu=100$ для Ст3 и $\sigma = 2,5$ МСм/м, $\mu=20$ для стали 9ХС.

Испытания для стальных образцов проводились на основе многочастотных вихретоковых измерений с использованием экспериментальной методики, при которой возбуждающий сигнал содержал специально подобранный набор гармоник с фиксированными частотами. Эта методика позволяла рассчитывать годографы по результатам одного измерения для всего выбранного набора частот. Используемый автоматизированный измерительный комплекс был описан ранее в работе [30]. При измерениях применялся накладной параметрический датчик, представлявший собой катушку индуктивности диаметром 20 мм с ферритовым сердечником. Испытания осуществлялись на 10 фиксированных частотах в интервале от 100 Гц до 10 кГц.

В результате вихретоковых измерений определялись экспериментальные значения импеданса вихретокового датчика. По этим значениям рассчитывались годографы, представлявшие графически в координатах «изменение активного сопротивления датчика $\Delta R/X_0$ – изменение реактивного сопротивления датчика $\Delta X/X_0$ ». Здесь $\Delta R=R - R_0$ и $\Delta X=\omega(L - L_0)$ – соответственно изменения активного и реактивного сопротивлений датчика, X_0 , L_0 , R_0 – соответственно реактивное сопротивление, индуктивность и активное сопротивление датчика без образца, X , L , R – эти же величины при измерениях с образцом, ω – циклическая частота входного синусоидального сигнала.

2. Экспериментальные результаты

Полученные результаты для образцов стали Ст3 и 9ХС с различными значениями толщин диэлектрического покрытия приведены в виде экспериментальных годографов на рис.1 и рис.2. Каждая точка на этих рисунках соответствует определенному значению фиксированной частоты ω . Верхние части линий годографа относятся к низким частотам, нижние части – к

высоким частотам. Из рис.1 и рис.2 видно, что влияние низких частот на вид годографа для сталей качественно близко к случаю материалов со слабыми магнитными свойствами [29], именно, при уменьшении частоты линии годографа стремятся к оси $\Delta X/X_0$ (то есть к значениям $\Delta R/X_0=0$). Аналогично ведут себя линии годографа при высоких частотах для случаев отсутствия или малости диэлектрического слоя. Отметим также, что изменение величины удельной электропроводности проявляется в сдвиге опытных точек вдоль линии годографа при сохранении ее расположения на плоскости $\Delta R/X_0 - \Delta X/X_0$.

На рис.1 проведено сопоставление годографов для сталей с разными значениями магнитной проницаемости μ для образцов с фиксированной толщиной диэлектрического покрытия. Из рис.1 видно, что влияние магнитных свойств в случае малых значений h весьма значительно и проявляется при низких частотах в изменении расположения линии годографа, именно, с ростом μ эта линия поднимается вверх по оси реактивных сопротивлений и отклоняется вправо от этой оси. Такое поведение обусловлено тем, что при росте магнитной проницаемости увеличивается магнитный поток, сцепленный с витками вихретокового датчика, что приводит к увеличению индуктивности датчика. С другой стороны, при фиксированной частоте возбуждающего сигнала увеличение μ влияет на скорость изменения магнитного потока, определяющую величину вихревых токов и, соответственно, тепловых потерь, возникающих на этих частотах, что приводит к отклонению линии годографа вправо. В то же время с ростом частот линии годографов сближаются. Это обусловлено уменьшением для высоких частот глубины скин-слоя, что приводит к снижению влияния на годограф физических свойств материала. Из рис. 1 также следует, что происходит сближение линий годографа и их сжатие вдоль оси активных сопротивлений при росте толщины диэлектрического покрытия. Это вызвано быстрым уменьшением влияния датчика на проводящий материал при его удалении от поверхности.

Рис.2 иллюстрирует изменение в расположении линий годографа с ростом толщины покрытия при фиксированном значении магнитной проницаемости. Как следует из рис.2, с ростом h наблюдается сближение точек, относящихся к разным частотам, приводящее к из-

менению формы годографа и его перемещению в область возле оси реактивных сопротивлений. Это обусловлено уже отмечавшимся снижением влияния вихревых токов в материале на измеряемые параметры системы «датчик-

образец». Более быстрое сближение нижних участков годографов связано с зависимостью глубина скин-слоя от частоты, вследствие которой при высоких частотах влияние роста h более значительно.

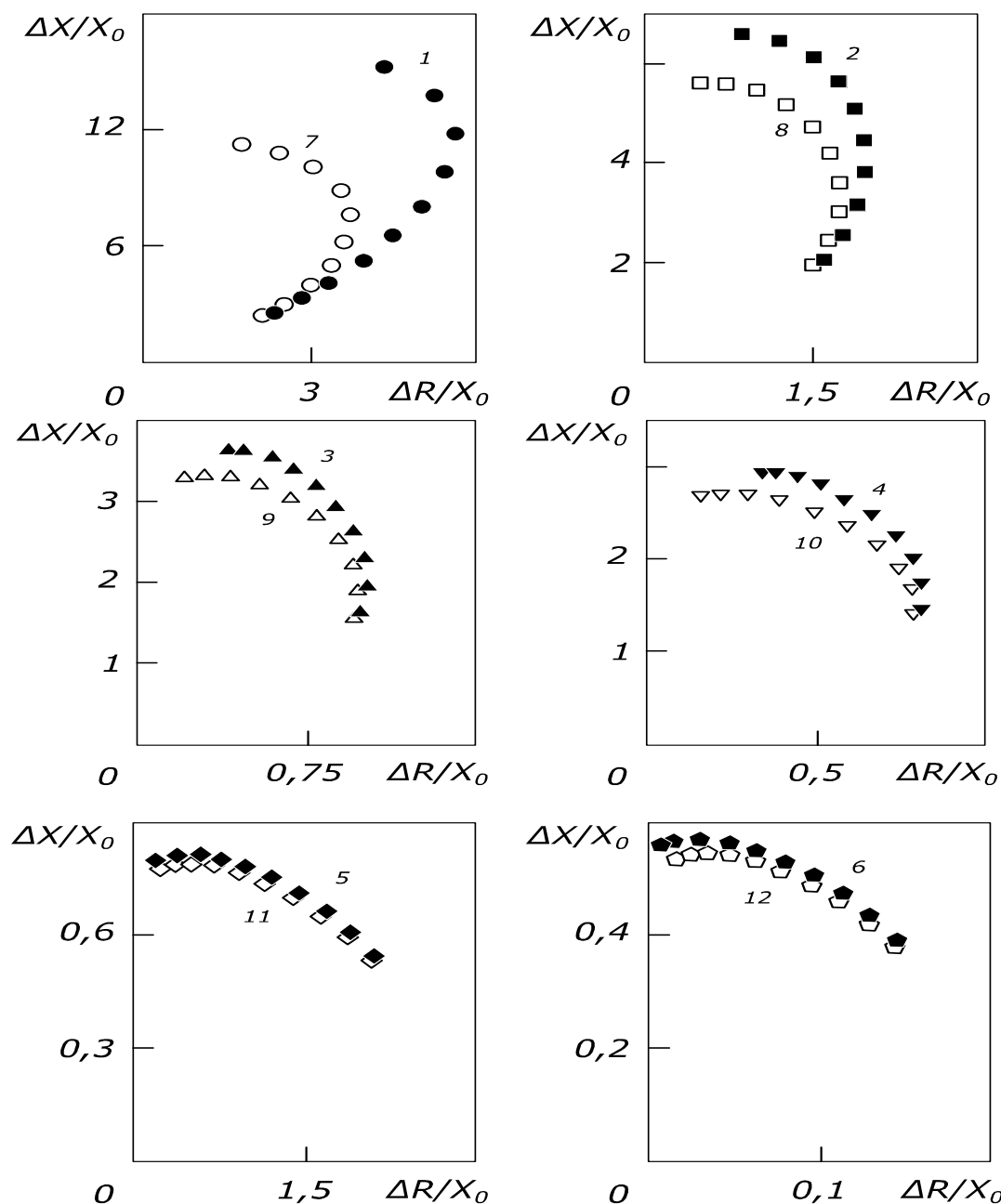


Рис.1. Влияние магнитных свойств стали на годографы при фиксированной толщине диэлектрического покрытия. Толщина покрытия h , сталь марки Ст3: 1 – без покрытия; 2 – 0,06 мм; 3 – 0,17 мм; 4 – 0,24 мм; 5 – 1 мм; 6 – 1,5 мм; сталь марки 9ХС: 7 – без покрытия; 8 – 0,06 мм; 9 – 0,17 мм; 10 – 0,24 мм; 11 – 1 мм; 12 – 1,5 мм)

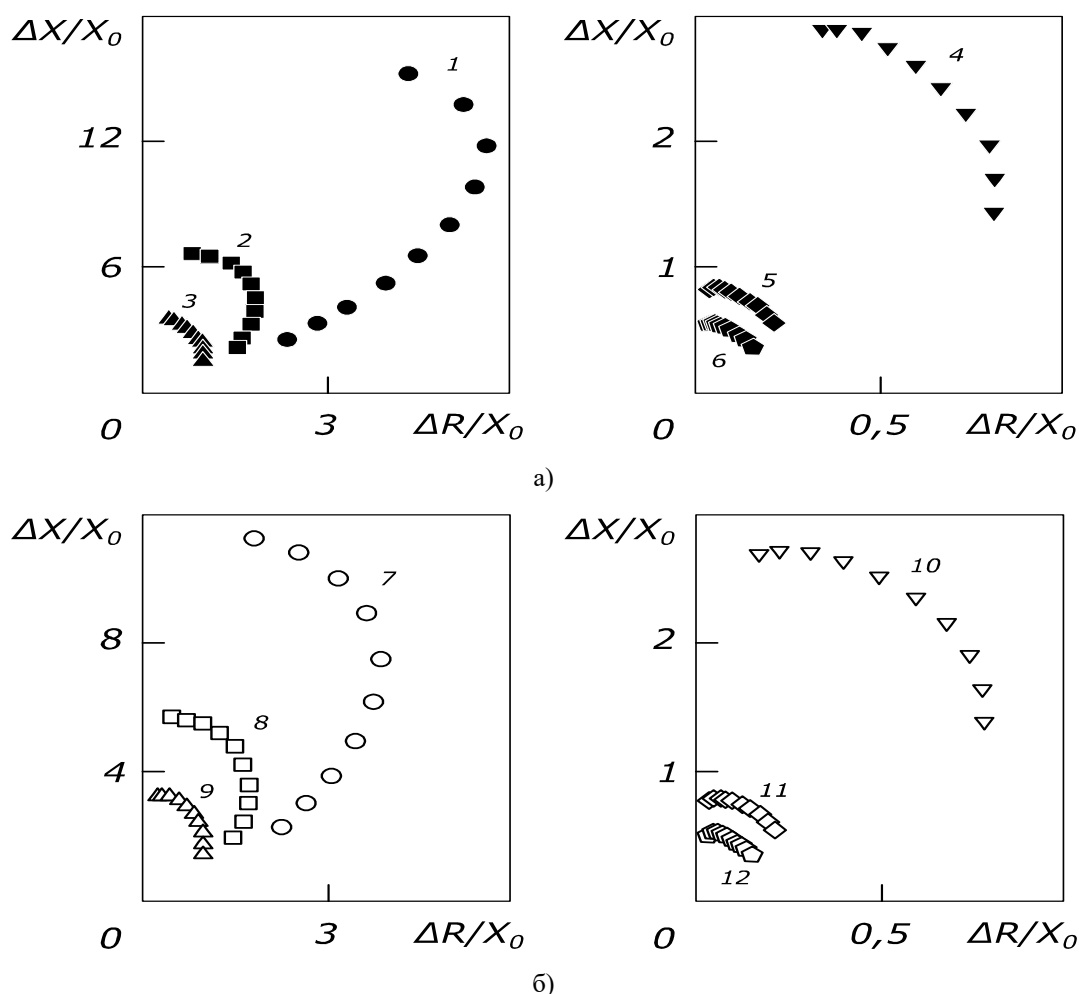


Рис.2. Влияние толщины диэлектрического покрытия на годографы стали. а) – сталь марки Ст3, толщина покрытия: 1 – без покрытия; 2 – 0,06 мм; 3 – 0,17 мм; 4 – 0,24 мм; 5 – 1 мм; 6 – 1,5 мм; б) – сталь марки 9ХС, толщина покрытия: 7 – без покрытия; 8 – 0,06 мм; 9 – 0,17 мм; 10 – 0,24 мм; 11 – 1 мм; 12 – 1,5 мм

3. Применение метода главных компонент

Для решения задач, возникающих при диагностике стальных изделий с упрочняющими и защитными покрытиями, необходимо провести выделение влияющих факторов, прежде всего разделить влияние магнитных свойств и расстояния между накладным датчиком и собственно проводящей поверхностью. С этой целью был применен подход, основанный на методе главных компонент, обеспечивший успешное разделение в случае немагнитных металлических материалов и сплавов со слабыми магнитными свойствами, описанный в работах [26-29]. Согласно используемому подходу, весь массив полученных опытных данных для исследовавшихся стальных образцов формировал многомерное пространство. Совокупность данных для конкретного образца, включавшая в себя точки экспериментального годографа, электрические

и магнитные характеристики, а также толщину покрытия, рассматривалась в качестве координат точки этого пространства. Образцы с близкими свойствами описывались точками, образующими связанные кластеры. Для анализа и интерпретации эти кластеры изображались в виде двумерных проекций на плоскость первой РС1 и второй РС2 главных компонент.

Результаты проведенных вычислений приведены на рис.3. Каждая точка на рис.3 описывает совокупность характеристик одного образца с конкретной толщиной диэлектрического покрытия. Из рис.3 видно, что образцы с одинаковыми значениями магнитной проницаемости, удельной электропроводности и толщины h формировали кластеры из близко расположенных друг к другу точек. Основным результатом расчетов явилось линейное разделение кластеров, описывавших стали с одной толщиной покрытия (разделение на группы то-

чек 2 и 8, 3 и 9, 4 и 10 и т.д.). Это разделение в соответствии с закономерностями, рассмотренными в предыдущем разделе, наиболее отчетливо наблюдается при малых величинах h . Таким образом, несмотря на различие в магнитных и электрических свойствах стальных образцов, проведенные расчеты обеспечили достаточно надежное разделение по значениям толщин диэлектрического покрытия.

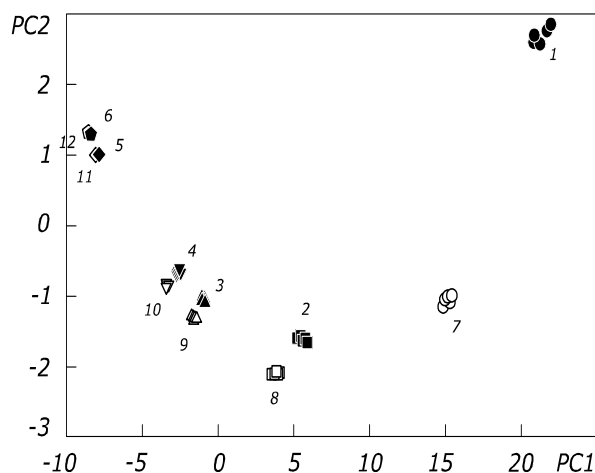


Рис.3. Проекция на главные компоненты результатов вихретоковых измерений для стали. Толщина покрытия, сталь марки Ст3: 1 – без покрытия; 2 – 0,06 мм; 3 – 0,17 мм; 4 – 0,24 мм; 5 – 1 мм; 6 – 1,5 мм; сталь марки 9ХС: 7 – без покрытия; 8 – 0,06 мм; 9 – 0,17 мм; 10 – 0,24 мм; 11 – 1 мм; 12 – 1,5 мм).

Заключение

Проведены многочастотные вихретоковые измерения для образцов конструкционной углеродистой стали Ст3 и инструментальной легированной стали 9ХС с различными электрическими и магнитными свойствами и разными толщинами диэлектрических покрытий. Описано влияние величины магнитной проницаемости и толщины покрытия на экспериментальные годографы, рассчитывавшиеся в широком диапазоне частот. Для разделения влияния физических характеристик и толщины покрытия проведена математическая обработка годографов на основе метода главных компонент. Результаты расчетов показали, что такая обработка позволила разделить влияние основных конкурирующих факторов и выделить кластеры данных, характеризующих толщину диэлектрического покрытия на проводящем магнитном материале.

Описанный подход может быть использован при осуществлении неразрушающей вихретоковой диагностики изделий из стали с защитными и упрочняющими покрытиями.

Список используемой литературы

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
2. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 288 с.
3. Auld B.A., Moulder J.C. Review of advances in eddy current nondestructive evaluation // Journal of Nondestructive Evaluation. – 1999. – V.18, No.1. – P. 3–36.
4. Ventre S., Calvano F., Pichenot G., Calmon P., Tamburrino A. ECT benchmark results for 3D defect signatures in industrial applications. NDT and E International. – 2011. – V.44, No.4. – P. 376–386.
5. García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing // Sensors (Basel). – 2011. – V.11(3). – P. 2525–2565.
6. Lulu Tian, Yuhua Cheng, Chun Yin, Xuegang Huang, Bo Zhang, Libing Ba Data-Driven Method for the Measurement of Thickness/Depth Using Pulsed Eddy Current // Sensors and Materials. – 2017. – V.29, No.9. – P. 1325–1338.
7. Song Z, Yamada T, Shitara H, Takemura Y. Detection of Damage and Crack in Railhead by Using Eddy Current Testing // J. Electromagn. Anal. Appl. – 2011. – No.3. – P. 546–550.
8. 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. – V.59, No.2. – P. 106–112.
9. Le Bihan Y., Pávó J., Marchand C. Characterization of small cracks in eddy current testing. European Physical // Journal Applied Physics. – 2008. – V.43, No.2. – P. 231–237.
10. Поляков В.В., Егоров А.В. Магнитные и электрические характеристики пористых ферромагнетиков // Доклады Академии наук. – 1995. – Т.344, №4. – С. 479–480.
11. Mercier D., Lesage J., Decoopman X., Chicot D. Eddy currents and hardness testing for

- evaluation of steel decarburizing // NDT E Int. – 2006. – V.39. – P. 652–60.
12. Egorov A.V., Polyakov V.V., Salita D.S., Kolubaev E.A., Psakhe S.G., Chernyavsky A.G., Vorobei I.V. Inspection of aluminum alloys by a multi-frequency eddy current method // Defence Technology. – 2015. – V.11, No.2. – P. 99–103.
13. Поляков В.В., Головин А.В., Егоров А.В., Утемесов М.А. Корреляционные связи между акустическими и физико-механическими характеристиками при ультразвуковом контроле пористых металлов // Дефектоскопия. – 1994. – №9. – С. 48–50.
14. 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.
15. Голубев С.С., Смирнова Н.И., Складановская М.И. Обеспечение единства измерений толщины металлических покрытий вихретоковыми фазовыми толщиномерами при их градуировке и поверке // Измерительная техника. – 2017. – №6. – С. 25–28.
16. Pedersen L.B., K.-A. M., Zhengsheng Y. Eddy Current Testing of Thin Layers Using Coplanar Coils // Nondestruct. Eval. – 2000. – V.12. – P. 53–64.
17. Дякин В.В., Сандовский В.А. Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. – М.: Наука, 1981. – 136 с.
18. 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. – С. 128–131
19. Егоров А.В., Поляков В.В. Вихретоковой контроль металлических материалов с помощью проекционных методов многомерного анализа данных // Дефектоскопия. – 2018. – №5. – С. 57–62.
20. Lingqi Li, Tsukada K., Hanasaki K., Zheng Liu Fusion of multi-frequency eddy current signals-by using wavelet analysis method // Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion. – 2002. – V.1. – P. 108–113.
21. Терехин И.В., Славинская Е.А. Контроль удельной электропроводности двухслойных немагнитных объектов импульсным вихретоковым методом // Дефектоскопия. – 2019. – №4. – С. 30–36.
22. Esbensen K.H., Geladi P. Principal Component Analysis: Concept, Geometrical Interpretation, Mathematical Background, Algorithms, History, Practice. In: Brown E-CSD, Tauler R, and Beata Walczak, editors. – Compr. Chemom., Oxford: Elsevier, 2009. – P. 211–26.
23. Comon P. Independent component analysis, A new concept? // Signal Processing. 1994. Vol;36. Pp. 287–314.
24. Wold S, Sjöström M, Eriksson L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics // Chemom. Intell. Lab. – 2001. – V.58. – P. 109–130.
25. 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, No.9. – P. 3147–3154.
26. Егоров А.В., Поляков В.В. Применение метода главных компонент при вихретоковом контроле алюминиевых сплавов // Дефектоскопия. – 2015. – №10. – С. 42–48.
27. 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.
28. Егоров А.В., Поляков В.В., Борцова Я.И., Кучерявский С.В. Многочастотная вихретоковая диагностика магнитных сплавов на основе меди с использованием метода главных компонент // Известия АГУ. – 2019. – №1. – С. 22–27.
29. Егоров А.В., Поляков В.В., Борцова Я.И. Применение проекционных методов многомерного анализа в вихретоковой толщинометрии // Измерительная техника. – 2019. – №7. – С. 49–53.
30. Егоров А.В., Поляков В.В., Лепендин А.А., Грачева Я.И. Применение сигналов специальной формы в многочастотных вихретоковых измерениях // Автометрия. – 2017. – Т.53, №3. – С. 28–35.

Поступила в редакцию 18.06.2020

Сведения об авторах

Егоров Александр Владимирович, к.ф.-м.н., доцент АлтГУ, egav@bk.ru

Поляков Виктор Владимирович, д.ф.-м.н., проф. АлтГУ, в.н.с. ИФПМ СО РАН, pvv@asu.ru

Кучерявский Сергей Владимирович, к.ф.-м.н., доцент, Университет Ольборга, svkucheryavski@gmail.com