

Многочастотная вихретоковая диагностика магнитных сплавов на основе меди с использованием метода главных компонент

А.В. Егоров¹, В.В. Поляков^{1,2}, Я.И. Борцова¹, С.В. Кучерявский³

¹ Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

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

³ Университет Ольборг (Эсбьерг, Дания)

Multi-Frequency Eddy Current Testing of Copper Based Magnetic Alloys Using the Principal Component Analysis

A.V. Egorov¹, V.V. Polyakov^{1,2}, Ja.I. Bortsova¹, 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)

Многочастотные вихретоковые измерения применяются для проведения неразрушающего контроля физических и геометрических характеристик изделий из магнитных металлических материалов. На примере магнитных бронз было исследовано совместное влияние на экспериментальные годографы системы «контролируемый образец — вихретоковой датчик» таких величин, как магнитная проницаемость, электропроводность, толщина магнитного материала и значение зазора между поверхностью материала и датчиком. Путем сопоставления с немагнитным медным сплавом изучено влияние магнитных свойств на вид линий годографа.

С целью разделения основных влияющих факторов результаты измерений (экспериментальные годографы) подвергались математической обработке с помощью метода главных компонент. При такой обработке вся совокупность экспериментальных данных, описывавших годограф конкретного образца, рассматривалась как координаты одной точки многомерного пространства. Результаты численных расчетов представлялись в виде проекций плоскости первых главных компонент. Такая обработка обеспечила наглядное разделение одновременно действующих конкурирующих факторов, проявившихся в формировании на плоскостях главных компонент кластеров из групп точек, описывавших образцы с близкими физическими и геометрическими свойствами.

Результаты работы показывают, что применение метода главных компонент расширило возможности вихретокового контроля магнитных металлических материалов. Предложенный подход может быть применен при разработке новых вихретоковых устройств неразрушающей диагностики изделий и конструкций.

Multi-frequency eddy current measurements are utilized to conduct non-destructive testing of physical and geometric characteristics of products made from magnetic metallic materials. Using the example of magnetic bronzes, the joint effect of several parameters like magnetic permeability, electrical conductivity, the thickness of magnetic material, and the value of the gap between the material surface and the sensor on experimental hodographs of the “controlled sample — eddy current sensor” system is investigated. The influence of magnetic properties on hodograph lines is studied by comparing the results with hodographs of a non-magnetic copper alloy.

The measurement results (experimental hodographs) are subjected to mathematical processing using the principal component method to separate the main influencing factors. Thus, the entire set of experimental data describing the hodograph of a particular sample is considered as the coordinates of one point of a multidimensional space. The results of numerical calculations are presented in the form of projections of the plane of the first principal components. This provides a visual separation of simultaneously acting competing factors manifested in the formation of clustered groups of points describing samples with similar physical and geometric properties on the planes of the main components.

Obtained results demonstrate that application of the principal component method has expanded the capabilities of eddy current testing of magnetic metallic materials. The proposed approach can be used for development of new eddy current devices for non-destructive diagnosis of products and structures.

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

Ключевые слова: метод вихревых токов, контроль материалов, магнитные материалы, медные сплавы, многомерный анализ данных, метод главных компонент.

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

DOI 10.14258/izvasu(2019)1-02

Введение

Диагностика качества материалов и конструкций, эксплуатируемых в различных экстремальных условиях, выдвигает повышенные требования к разработке новых физических методов диагностики структуры, физико-механических характеристик, геометрических параметров различных изделий. В случае конструкций из металлов и сплавов одним из наиболее распространенных и достоверных методов неразрушающего контроля является метод вихревых токов [1]. В то же время практическое применение вихретокового метода ограничивает то обстоятельство, что результат проводимых измерений зависит от одновременного действия большого числа конкурирующих факторов. К таким факторам относятся физические характеристики материала: удельная электропроводность и магнитная проницаемость [2, 3], геометрические параметры объектов контроля [4, 5], особенности строения материала [6] и наличие дефектов структуры [7–9], режимы измерений [10, 11], конструктивные особенности вихретоковых датчиков [12] и т.д. Совместное действие мешающих анализу факторов существенно затрудняет выделение контролируемых свойств.

Перспективным подходом, позволяющим провести адекватное разделение факторов, влияющих на результаты вихретоковых измерений, и количественно описать контролируемые характеристики, является математическая обработка результатов измерений на основе методов многомерного анализа данных [13–15]. Такая обработка показала свою эффективность для контроля физических и геометрических параметров изделий из немагнитных металлических материалов с различным химическим составом, в том числе при различных условиях испытаний измерений [16].

Количественный вихретоковый контроль значительно усложняется в случае магнитных материалов, для которых к числу наиболее значимых физических характеристик, существенно влияющих на результаты измерений, добавляется описывающая магнитные свойства материала магнитная проницаемость. В случае многочастотных вихретоковых измерений отличие магнитной проницаемости от значения $\mu = 1$ проявляется в изменении вида годографов, описывающих систему «контролируемый объект — вихретоковый датчик». Увеличение числа конкурирующих факторов делает задачу их разделения при контроле еще более сложной. В настоящей работе математический аппарат многомерного анализа данных применяется к обработке многочастотных вихретоковых измерений магнитных материалов. В качестве таких

материалов выступают магнитные бронзы, позволяющие путем сопоставления с немагнитными бронзами ($\mu = 1$) с достаточно близкими химическим составом и электрическими свойствами исследовать возможности развиваемого подхода.

Материалы и метод измерений

Измерения проводились для двух сплавов на основе меди — бронзы Бр9А4Ж и Бр5О5Ц5С — с разными магнитными характеристиками. Оба сплава широко применяются в современной машиностроительной и авиационной промышленности, прежде всего в качестве антифрикционных материалов. Основными легирующими элементами для сплава Бр9А4Ж были алюминий и железо, определяющие появление магнитных свойств, сплава Бр5О5Ц5С — олово, цинк и свинец, остальные химические элементы присутствовали в незначительном количестве (порядка 1%). Магнитная алюминиевая бронза марки Бр9А4Ж отличалась отчетливо выраженными магнитными свойствами, характеризовавшимися значением магнитной проницаемости $\mu = 1,1$. Немагнитная оловянная бронза марки Бр5О5Ц5С описывалась магнитной проницаемостью $\mu = 1$. Удельные электрические проводимости σ обеих бронз составляли для Бр9А4Ж $\sigma = 7,2$ МСм/м и для Бр5О5Ц5С $\sigma = 11,0$ МСм/м.

Образцы для испытаний изготавливались в виде плоскопараллельных пластин, имевших вид цилиндров диаметром 50 мм и различной высоты, задававшей толщину пластины d . Геометрические размеры образцов обеспечивали исключение краевых эффектов. Толщина образцов изменялась в интервале от $d = 1$ мм до $d = 20$ мм. Величина зазора h между поверхностью объекта контроля и накладным параметрическим датчиком создавалась с помощью диэлектрических прокладок и изменялась в интервале от $h = 0$ (зазор отсутствовал) до $h = 1$ мм.

Для проведения испытаний использовалась модификация многочастотных вихретоковых измерений, описанная в работе [11]. Использованный метод позволял строить линию годографа одновременно для всей выбранной совокупности частот измерений в заданном диапазоне. Экспериментальные годографы отражали совместное действие всех основных факторов, влияющих на результаты измерений и существенных для контроля свойств исследуемых материалов.

При проведении испытаний использовался измерительно-вычислительный комплекс, описанный в [2]. Для измерений применялся индуктивный параметрический датчик накладного типа, представлявший собой катушку индуктивности с сердечником, изготовленным

из феррита, диаметр датчика — 20 мм. Сами измерения осуществлялись в интервале от 100 Гц до 10 кГц на 20 фиксированных частотах. Испытания проводились для групп образцов, каждая из которых включала в себя пять образцов с одинаковыми значениями магнитной проницаемости, удельной электрической проводимости, толщины пластины и величины зазора.

При испытаниях определялись экспериментальные значения импеданса вихревого датчика. Получаемые результаты были представлены графически, 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 — соответственно активное сопротивление, индуктивность и реактивное сопротивление датчика без образца, ω — циклическая частота входного синусоидального сигнала.

Экспериментальные результаты

Полученные результаты в виде экспериментальных годографов в координатах $\Delta R/X_0 - \Delta X/X_0$ приведены для исследованных бронз на рисунках 1–3, каждая точка на этих рисунках соответствует одной фиксированной частоте. Отметим, что влияние частоты измерения для магнитного материала качественно такое же, как в случае немагнитного материала с $\mu = 1$. Именно точки, описывавшие низкие частоты, образовывали верхнюю часть линии годографа и при уменьшении частоты стремились к оси ординат $\Delta X/X_0$ (к значениям $\Delta R/X_0 = 0$); точки, соответствовавшие высоким частотам, формировали нижнюю часть годографа и при росте частоты также приближались к этой ординате.

Влияние магнитных свойств на годографы иллюстрирует рисунок 1. Из рисунка 1 видно, что уве-

личение магнитной проницаемости в области низких частот (верхняя часть годографов) поднимает по оси реактивных сопротивлений ветвь, описывающую магнитный материал. Проявление этого эффекта именно на низких частотах обусловлено увеличением магнитного потока в системе «образец — датчик» при росте магнитной проницаемости. Асимптотическое положение верхнего участка линии годографа на оси $\Delta X/X_0$ при $\Delta R/X_0 = 0$ зависит от величины $K = (\mu - 1) / (\mu + 1)$, т.е. для немагнитных образцов ($\mu = 1$) оно равняется нулю, а с ростом μ увеличивается. При высоких частотах линии годографов сближаются до полного перекрытия, так как с ростом магнитной проницаемости толщина скин-слоя уменьшается, а влияние физических свойств материала в целом ослабевает.

Отметим, что точки, описывающие образцы с большей магнитной проницаемостью, при одной и той же частоте располагаются выше. Это связано с тем, что определяющая поведение годографа величина обобщенного вихревого параметра

$$\beta = r \sqrt{\mu_0 \mu \sigma \omega}$$

(здесь r — эффективный радиус накладного датчика, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная) с ростом частоты увеличивается.

Влияние различий в удельной электропроводности было исследовано ранее [16] и проявлялось в том, что при росте σ происходит сдвиг экспериментальных точек вдоль линии годографа из верхней части этой линии, соответствующей низким частотам, в ее нижнюю часть, описывавшую высокие частоты. Такое поведение аналогично сдвигу точек при изменении магнитной проницаемости и вызвано тем, что их положение при фиксированных геометрических параметрах и условиях измерения зависит только от величины $\beta \sim \sqrt{\omega \sigma}$.

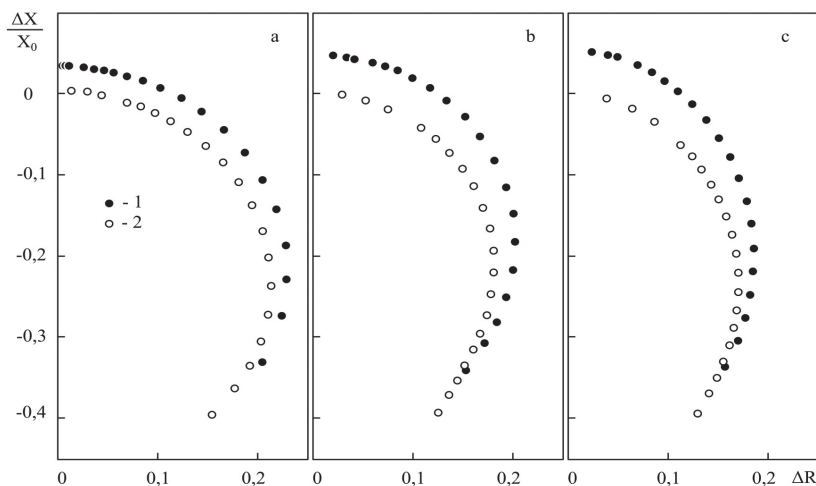


Рис. 1. Влияние магнитных свойств материала на годографы: 1 — магнитная бронза Бр9А4Ж; 2 — немагнитная бронза Бр5О5Ц5С
Толщина образца d: а — 1,5 мм, б — 4 мм, с — 9 мм (зазор h = 0)

Влияние *толщины* образца на годографы магнитной бронзы Бр9А4Ж представлено на рисунке 2 для различных условий измерения, задаваемых зазором. Из рисунка 2 следует, что годографы образцов с разной толщиной различаются по форме: с ростом d кривые приближаются к оси $\Delta X/X_0$ и далее сближаются, перекрываясь для высоких толщин. Это связано с тем, что величина активных потерь в системе «датчик — образец» зависит от соотношения толщины образца и величины

скин-слоя в материале. При значениях d , превышающих толщину скин-слоя, дальнейшее увеличение величины d на поведении линий годографа перестает сказываться. Из рисунка 2 также видно, что на высоких частотах (нижний участок годографов) перекрывание линий годографов при увеличении d происходит наиболее быстро. Это обусловлено тем, что при большой частоте скин-слой мал, и уже при малых толщинах изменение d перестает влиять на линии годографа.

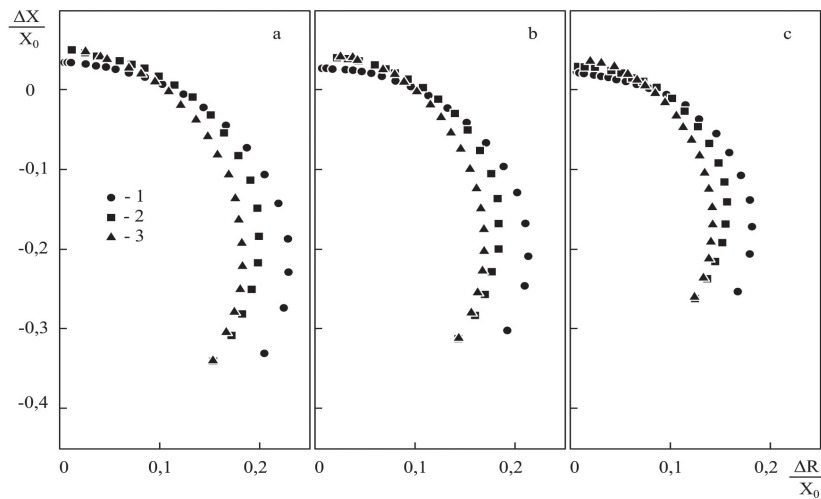


Рис. 2. Влияние толщины пластины на годографы магнитной бронзы.
Толщина образца d : 1 — 1,5 мм; 2 — 4 мм, 3 — 9 мм
Величина зазора h : а — 0 (без зазора), б — 0,2 мм, с — 0,6 мм

Влияние величины *зазора* рассмотрено на рисунке 3 для образцов магнитной бронзы различной толщины. Как видно из рисунка 3, линии годографа при увеличении зазора изменялись по форме и сдвигались друг относительно друга к оси $\Delta X/X_0$. Такое «сжатие» кривых с ростом h в конечном счете свидетельствовало об уменьшении влияния вихревых токов на параметры датчика при его удалении от проводящей поверхности.

Роль зазора наиболее отчетливо проявлялась в нижних частях годографов, относившихся к области высоких частот. Это связано с тем, что глубина скин-слоя пропорциональна величине $\omega^{-1/2}$, а при высоких частотах ω она быстро уменьшается. Так, при переходе от 100 Гц к 1 кГц в меди глубина снижается от ~6,6 мм до ~2,1 мм. Как следствие, при высоких значениях ω изменение значений h проявляется более явно.

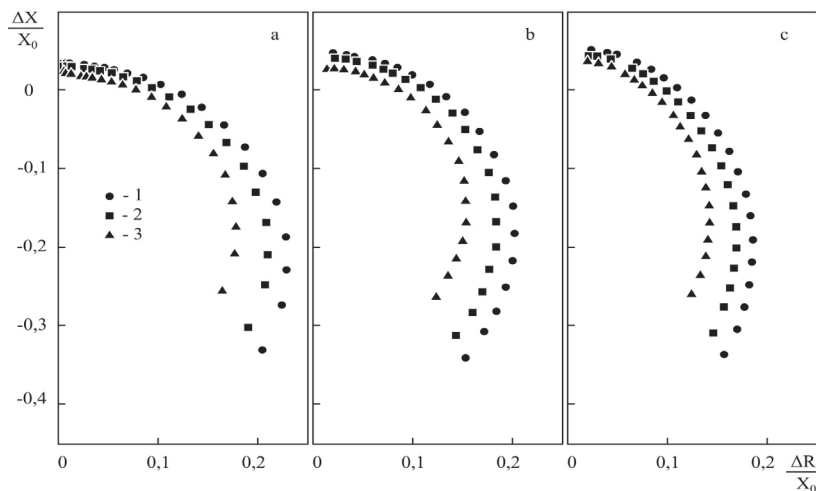


Рис. 3. Влияние зазора между материалом и датчиком на годографы магнитной бронзы.
Величина зазора h : 1 — 0 (без зазора), 2 — 0,2 мм, 3 — 0,6 мм
Толщина образца d : а — 1,5 мм, б — 4 мм, с — 9 мм

Отметим, что влияние зазора на поведение годографа магнитных материалов качественно отличалось от случая материалов с $\mu = 1$. Именно верхние участки линий годографа, соответствовавшие разным зазорам, при $\Delta R/X_0 = 0$ асимптотически стремились к различным значениям $\Delta X/X_0$, причем тем меньшим, чем больше была величина h .

Применение метода главных компонент

Расположение экспериментальных точек на рисунках 1–3 показывает, что разделить по виду годографов влияние отдельных факторов на измеряемые характеристики достаточно затруднительно. Это свидетельствует о важности разработки методов, которые могли бы обеспечить такое разделение. С этой целью привлечен метод главных компонент, показавший свою эффективность в случае немагнитных материалов [16]. Согласно этому методу экспериментальные данные, описывавшие годограф конкретного образца, рассматривались как координаты точки многомерного пространства. Совокупность таких точек формировала так называемый вектор признаков. Этот вектор признаков характеризовал реакцию параметрического датчика на контролируемый образец. Точки, описывавшие образцы с одинаковыми свойствами, располагались вблизи друг от друга в одной области многомерного пространства. Выявление латентных закономерностей из массива экспериментальных данных достигалось за счет перехода к новой системе координат, которая строилась таким образом, что ее первая ось (главная компонента PC1) ориентировалась в многомерном пространстве в направлении максимального разброса экспериментальных точек, вторая ось (главная компонента PC2) — в направлении разброса точек, следующего по величине, аналогично вводились другие оси. Для наглядного представления результатов использовались двумерные проекции многомерных экспериментальных данных на плоскости первых главных компонент.

Непосредственное применение метода главных компонент заключалось в численной обработке экспериментальных годографов и проводилось следующим образом. Координатами вектора признаков в проведенных измерениях являлись относительные измене-

ния активного сопротивления $\Delta R(\omega_n)/X_0$ и реактивного сопротивления $\Delta X(\omega_n)/X_0$ вихретокового датчика при использованных для построения годографа n частотах ω_n , ($n = 20$). Каждый образец характеризовался таким вектором в $2n$ -мерном пространстве, положение которого определялось измеренными значениями магнитной проницаемости, удельной электрической проводимости, толщины образца и величины зазора, т.е. всеми основными влияющими факторами.

Результаты расчетов по методу главных компонент представлены на рисунке 4 виде проекций на главные оси PC1 и PC2. Как видно из рисунка 4, точки, описывавшие образцы с одинаковыми свойствами (т.е. с одинаковыми значениями μ , σ , d и h), образовывали кластеры из близко расположенных точек. Небольшие расхождения в положении этих точек внутри кластера обусловлены погрешностью измерений. Кластеры, характеризовавшие образцы с одинаковыми значениями одного из влияющих факторов, располагались на плоскостях главных компонент с определенными закономерностями, образуя специфические группы кластеров. В целом, из рисунка 1 следует, что проведенная обработка позволила наглядно разделить влияющие факторы.

Из рисунка 4 видно, что кластеры точек, описывавшие образцы с разными значениями магнитной проницаемости, линейно разделились по оси PC1, при этом с ростом μ кластеры сдвигались вдоль этой оси. Роль толщины образцов проявилась в том, что кластеры точек, отвечавших разным толщинам, также разделились по главным осям, причем с увеличением значений d кластеры сближались и при больших толщинах перекрывались. Влияние зазора выразилось в сдвиге кластеров вдоль оси PC2, при этом, чем больше была величина зазора, тем дальше соответствующие группы точек удалялись от случая $h = 0$. В целом, можно сказать, что ось PC1 отражала в первую очередь разделение материалов по физическим свойствам (величина магнитной проницаемости), тогда как ось PC2 отвечала в основном за особенности режима измерений (размер зазора между датчиком и поверхностью материала).

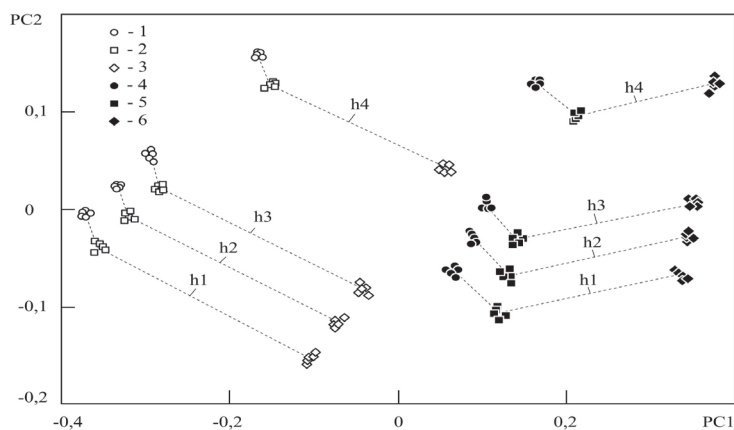


Рис. 4. Проекция экспериментальных данных на плоскость первых главных компонент. Толщина образца d , немагнитная бронза Бр5О5Ц5С5-5-5: 1 — 9 мм; 2 — 4 мм; 3 — 1,5 мм; магнитная бронза Бр9А4Ж: 4 — 9 мм; 5 — 4 мм; 6 — 1,5 мм. Величина зазора h : $h_1 = 0$ (без зазора); $h_2 = 0,06$ мм; $h_3 = 0,2$ мм; $h_4 = 0,6$ мм

Заключение

Многочастотные вихретоковые измерения были применены для исследования основных физических и геометрических характеристик магнитных сплавов на основе меди. Путем сопоставления экспериментальных годографов, полученных для магнитных и немагнитных бронз, изучено влияние магнитных свойств на поведение годографов при различной толщине образцов и разных значениях зазора между поверхностью материала и накладным датчиком. Для разделения основных влияющих факторов экспериментальные годографы подвергались матема-

тической обработке с помощью метода главных компонент. Показано, что такая обработка обеспечила наглядное разделение конкурирующих факторов, что нашло свое отражение в формировании на плоскостях главных компонент кластеров точек, описывавших образцы с близкими физическими и геометрическими свойствами.

Предложенный подход может быть применен для вихретоковой диагностики изделий из магнитных материалов, а также при разработке новых устройств неразрушающего контроля, основанных на использовании метода вихревых токов.

Библиографический список

1. García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing // Sensors (Basel). 2011. Vol. 11(3).
2. 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.
3. Поляков В.В., Егоров А.В. Магнитные и электрические характеристики пористых ферромагнетиков // Доклады Академии наук. 1995. Т. 344, № 4.
4. Lulu Tian, Yuhua Cheng, Chun Yin, Xuegang Huang, 1 Bo Zhang, and Libing Ba. Data-Driven Method for the Measurement of Thickness/Depth Using Pulsed Eddy Current // Sensors and Materials. 2017. Vol. 29, No9.
5. Yang H.C., Tai C.C. Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate // Measurement Science and Technology. 2002. Vol. 13.
6. Mercier D, Lesage J, Decoopman X, Chicot D. Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing // NDT E Int. 2006. №39.
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. №3.
8. Zenglu Song, Tsutomu Yamada, Hideki Shitara, Yasushi Takemura. Detection of Damage and Crack in Railhead by Using Eddy Current Testing // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. 2011. № 3.
9. 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, No2.
10. 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. Vol. 1.
11. 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. Т. 11, № 2.
12. Pedersen LB, K.-A. M, Zhengsheng Y. Eddy Current Testing of Thin Layers Using Co-planar Coils // Nondestruct. Eval. 2000. Vol. 12.
13. 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, 2009.
14. Comon P. Independent component analysis, A new concept? // Signal Processing. 1994. Vol. 36.
15. Wold S, Sjöström M, Eriksson L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics // Chemom. Intell. Lab. Vol. 2001.
16. Егоров А.В., Поляков В.В. Вихретоковый контроль металлических материалов с помощью проекционных методов многомерного анализа данных // Дефектоскопия. 2018. №5.