

УДК 620.179.14

*А.В. Егоров, А.В. Парфенова*

**Применение методов многомерного анализа для интерпретации результатов вихретокового контроля пористых металлических материалов**

*A.V. Egorov, A.V. Parfenova*

**Application of Multivariate Analysis for Interpreting the Results of Eddy Current Testing of Porous Metal Materials**

Проведено измерение основных информативных характеристик вихретокового метода при контроле качества спекания изделий, изготовленных из порошкового железа. Для интерпретации полученных результатов был привлечен математический аппарат многомерного анализа данных. Построенные методом главных компонент модели были проверены на тестовом наборе образцов и показали свою эффективность.

**Ключевые слова:** метод вихревых токов, пористые металлы, многомерный анализ данных.

Вихретоковые методы контроля находят широкое применение при неразрушающей диагностике металлических изделий. Эти методы являются многопараметрическими и используются для локализации различных поверхностных и подповерхностных дефектов, определения геометрических размеров изделий, контроля внутренней структуры материала, из которого они изготовлены [1]. Основная сложность при реализации данного метода заключается в том, что при контроле одного из параметров остальные являются мешающими и их влияние необходимо исключать. Этого добиваются различными способами [2]. Наиболее перспективен метод многопараметровых вихретоковых испытаний, позволяющий разделять различные переменные [3]. Он характеризуется повышенной сложностью в обработке и анализе результатов контроля. В последнее время наибольшее распространение получают измерительно-вычислительные комплексы, позволяющие обрабатывать большое число экспериментальных данных. При обработке большого числа регистрируемых параметров хорошо зарекомендовали себя методы многомерного анализа данных [4], которые показали свою эффективность при решении различных задач [5]. Они позволяют выявить внутренние взаимосвязи на фоне различных помех. В настоящей работе математический аппарат методов многомерного анализа данных был применен для обработки результатов многопараметрового вихретокового кон-

The authors made measurement of basic informative characteristics of the eddy current method for quality control of sintering products made of iron powder. Mathematical formalism of multidimensional data analysis was used for the interpretation of results. Models constructed using principal components were tested on a test set of samples and demonstrated their effectiveness.

**Key words:** eddy current testing, porous metal, multidimensional data analysis.

троля качества спекания пористых металлических материалов на основе железа.

Измерения проводили на образцах, изготовленных из порошкового железа марки ПЖРВ2, путем прессования до требуемой степени пористости. Они имели форму цилиндров высотой 15 мм и диаметром 20 мм. Образцы делились на две группы: спеченные и неспеченные. Пористость внутри каждой группы варьировалась от 7 до 30%. Спеченные образцы проходили термическую обработку в вакуумной печи при температуре 1520К в течение 2,5 часов. Для неспеченных образцов термообработка не проводилась.

Вихретоковый контроль пористых материалов проводили на измерительно-вычислительном комплексе, имеющем частотный диапазон от 100 Гц до 15 кГц. Использовали накладной параметрический датчик с сердечником полуброневого типа внешним диаметром 7 мм, который был включен в измерительную цепь, преобразующую импеданс в амплитуду и фазу переменного напряжения. Регистрацию входного и выходного сигналов измерительной цепи проводили с помощью двухканального 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя, позволяющего синхронно измерять мгновенные значения напряжения в каждом канале. На каждой частоте получали 4096 отсчетов, которые аппроксимировали синусоидальной зависимостью и определяли амплитуду, частоту и начальную фазу сигнала для каждого канала. Эти данные использовали

для вычисления комплексного сопротивления вихретокового преобразователя в широком диапазоне частот. По особенностям изменения импеданса датчика на разных частотах возбуждающего тока определяли корреляционные связи с параметрами объекта контроля.

Взаимосвязь между результатами вихретокового контроля и характеристиками образцов анализировали с помощью метода главных компонент [4]. На рисунке 1 приведен график счетов для пористого материала на основе железа. По осям абсцисс и ор-

динат откладывали первую и вторую главные компоненты соответственно. Видно, что образцы разделились на две неперекрывающиеся группы. В левой части графика сгруппированы образцы, прошедшие термическую обработку (класс спеченных материалов), а в правой – без термообработки (класс неспеченных материалов). Этот график показывает принципиальную возможность идентификации спеченного и неспеченного пористого железа данным методом.

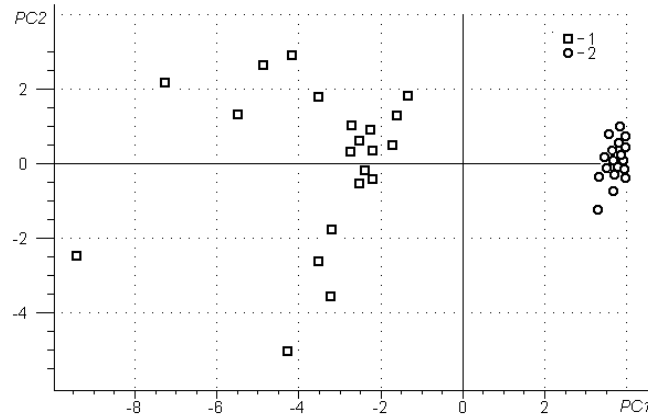


Рис. 1. График счетов для пористого материала на основе железа (1 – спеченные образцы; 2 – неспеченные образцы)

Последовательно применяя метод главных компонент к различным классам по отдельности, были построены две математические модели. Для их проверки использовали дополнительный набор образцов. Он включал в себя пять спеченных, пять неспеченных и три прессованных образца без термообработки, но подверженных коррозии. Результаты тестирования представлены на рисунке 2 в виде графика зависимости расстояния от объекта контроля до моделей, построенных методом главных компонент. По

осям абсцисс и ординат откладывались расстояния до моделей неспеченного и спеченного материала соответственно. Пересекающиеся прямые линии задавали границу доверительных интервалов, которая соответствовала уровню значимости  $\alpha = 5\%$ . Из графика видно, что 10 тестовых образцов были правильно отнесены к соответствующим классам. Следует отметить, что дефектные образцы, подвергнутые коррозии, на графике находились в области, не относящейся ни к одной из построенных моделей.

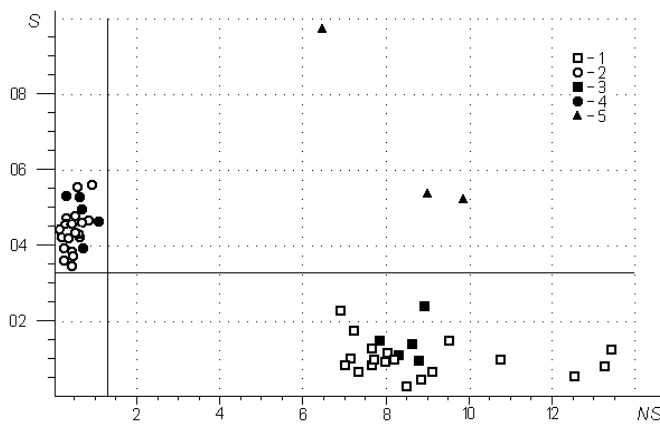


Рис. 2. Зависимость расстояния от образца до моделей спеченного и неспеченного железа (1 – спеченные образцы (обучающий набор); 2 – неспеченные образцы (обучающий набор); 3 – спеченные образцы (тестовый набор); 4 – неспеченные образцы (тестовый набор); 5 – неспеченные образцы с дефектом (тестовый набор))

Проведенные исследования свидетельствуют, что применение многомерного анализа данных для обработки результатов контроля многочастотного вихретокового метода позволяет классифицировать

спеченные и неспеченные пористые материалы и может служить основой для разработки неразрушающего метода контроля качества спекания порошковых материалов на основе железа.

### Библиографический список

1. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.П. Филинов и др.; под ред. В.В. Клюева. – М., 1995.

2. Методы неразрушающих испытаний. Физические основы, практические применения, перспективы развития / под ред. Р. Шарпа; пер. с англ. – М., 1972.

3. Поляков В.В., Егоров А.В. Вихретоковой контроль удельной электрической проводимости и магнитной про-

ницаемости изделий из магнитомягких материалов // Дефектоскопия. – 1992. – №12.

4. Эсбенсен К. Анализ многомерных данных. Избранные главы: пер. с англ. С.В. Кучерявского; под ред. О.Е. Родионовой. – Черноголовка, 2005.

5. Егоров А.В., Кучерявский С.В., Поляков В.В. Применение метода главных компонент для акустико-эмиссионной диагностики алюминиевых сплавов // Известия АлтГУ. – 2007. – №1.