

А. В. Егоров, В. В. Поляков, Д. С. Салита, Е. А. Колубаев

Диагностика сплавов алюминия методом вихревых токов*

A. V. Egorov, V. V. Polyakov, D. S. Salita, E. A. Kolubaev

Eddy Current Testing of Aluminum Alloys

Многочастотный метод вихретоковых испытаний позволяет проводить неразрушающий контроль изделий из неферромагнитных материалов. Он характеризуется повышенной сложностью в обработке и анализе полученных результатов контроля, но наиболее перспективен для применения в измерительно-вычислительных комплексах, позволяющих обрабатывать большое число экспериментальных данных. Проведена экспериментальная проверка влияния различных параметров изделия из алюминиевых сплавов на выходные параметры вихретокового датчика в широком диапазоне частот возбуждающего электромагнитного поля. Для определения параметров вихретокового датчика применяли цифровые методы обработки, использующие аппроксимацию мгновенных значений сигнала исходной модельной функцией, параметры которой определяли по методу наименьших квадратов. Это позволило эффективно избавиться от помех и существенно повысить точность измерений. Полученные результаты показали, что предложенная методика обработки результатов измерений обеспечивает достаточно надежное построение годографов. Это делает ее перспективной для проведения многопараметрического контроля немагнитных материалов.

Ключевые слова: метод вихревых токов, диагностика материалов, алюминиевые сплавы.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-54

Один из методов неразрушающего контроля металлических материалов — метод вихревых токов, который позволяет выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты, определять геометрические параметры, такие как толщина металлических листов или диэлектрических покрытий на них, оценивать внутреннюю структуру материала, из которого они изготовлены [1–4]. Основная сложность при реализации данного метода заключается в том, что он является многопараметрическим и вариация любого параметра контролируемого изделия может привести к изменению выходного сигнала измерительного датчика. При контроле какой-либо характеристики остальные будут мешающими, поэтому их влияние необходимо исключать. Этого

In this paper, we apply the multi-frequency eddy current testing for nondestructive testing of products made of non-ferromagnetic materials. Such method is extremely complex to process and analyze obtained results of control. However, it is the most promising method for measuring and computing complexes handling a large number of experimental data. The paper provides an experimental validation of various properties of aluminum alloy products affecting the output parameters of the eddy current sensor in a wide range of frequencies of an exciting electromagnetic field. Digital processing techniques with instantaneous values approximation by the signal source model function are applied. Parameters of the model function are derived by least square method. This approach allows us to eliminate noises and significantly improves the measurement accuracy. Obtained results demonstrate that proposed technique of measurement results processing produces fairly reliable hodograph plots and appears to be promising for multivariable control of nonmagnetic materials.

Key words: eddy current testing, testing of materials, aluminum alloys.

добиваются различными способами. Наиболее перспективен метод многочастотных вихретоковых испытаний, позволяющий разделять различные переменные. Он характеризуется повышенной сложностью в обработке и анализе полученных результатов контроля, но считается наиболее перспективным для применения в измерительно-вычислительных комплексах для обработки большого числа экспериментальных данных [5, 6]. В настоящей работе проведена экспериментальная проверка влияния различных параметров образцов из алюминиевых сплавов [7] на выходные параметры вихретокового датчика в широком диапазоне частот возбуждающего электромагнитного поля.

* Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного Министерством образования и науки РФ (дог. №02.G25.31.0063).

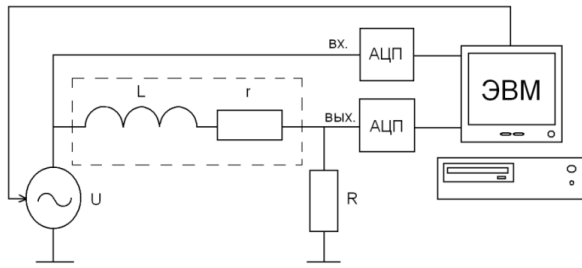


Рис. 1. Схема измерений

В качестве вихретокового преобразователя применяли параметрический датчик с размером зоны контроля 5x15 мм, который был включен в измерительную цепь, представленную на рисунке 1. Измерения проводили на семи частотах: 100; 200; 400; 800 Гц; 1,6; 3,2 и 6,4 кГц. В ходе эксперимента синхронно регистрировали мгновенные значения входного и выходного сигналов с помощью 12-разрядных аналого-цифровых преобразователей с частотой выборки 44100 Гц в течение 1 секунды для каждой частоты.

При обработке данных учитывали, что полезную информацию несут не абсолютные значения сигнала, а их небольшие изменения. Это накладывало жесткие требования к точности измерения. Задача осложнялась еще и тем, что в регистрируемом сигнале неизбежно присутствовала шумовая помеха, которая ограничивала область применения большинства методов измерений. Из существующих методов обработки применяли цифровые методы, использующие аппроксимацию мгновенных значений сигнала исходной модельной функцией, параметры которой определяли по методу наименьших квадратов. Для синусоидального сигнала, как правило, используют тригонометрические функции, где определяемыми параметрами являются амплитуда и начальный угол. Это позволяет эффективно избавиться от помех и существенно повысить точность измерений. Однако при реализации данного метода приходится накапливать сумму произведений мгновенных значений сигнала на значения тригонометрических функций, что предъявляет

повышенные требования к производительности вычислительного комплекса. Для стационарных диагностических систем это не принципиально, но для портативных (на основе микроконтроллеров общего применения) может оказаться сдерживающим фактором. Поэтому для определения комплексных амплитуд гармонического сигнала применялись функции Уолша [7]. Мгновенные значения сигнала аппроксимировали линейной комбинацией трех первых функций Уолша с коэффициентами, которые определяли путем обработки экспериментальных данных. Критерием оптимального подбора данных коэффициентов являлся минимум целевой функции, представляющей собой сумму квадратов разности исходного и модельного сигналов. Так как значения функций Уолша дискретны и принимают значения либо +1, либо -1, то операция умножения сводилась к смене знака соответствующих величин при их суммировании. Поскольку данные передавались от аналого-цифрового преобразователя и имели целочисленный формат, операции с плавающей точкой выполнялись только на заключительном этапе при расчете весовых коэффициентов по накопленным суммам мгновенных значений сигнала. Найденные коэффициенты были численно равны рассчитанным, которые получали при разложении синусоидальной функции в конечный ряд Уолша по трем первым функциям. Такой ряд очень грубо описывает гармонический сигнал, но его коэффициенты содержат полную информацию о нем. В частности, коэффициент при функции Уолша с нулевым номером численно равен постоянной составляющей гармонического сигнала. Отношение найденных коэффициентов первой и второй функций зависело только от его начальной фазы, а сумма их квадратов была численно равна квадрату среднего значения гармонического сигнала. На рисунке 2 приведена аппроксимация зашумленного гармонического сигнала линейной комбинацией трех первых функций Уолша. Предложенный подход позволил существенно повысить точность определения комплексной амплитуды сигнала на фоне аддитивной помехи.

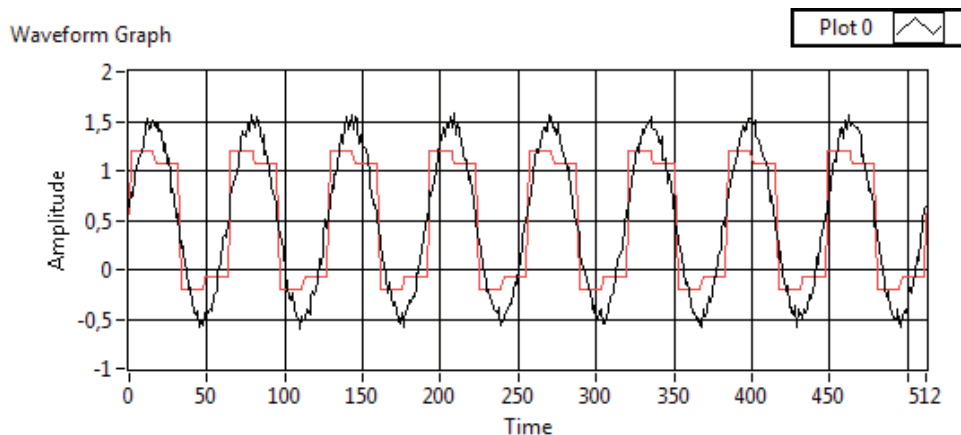


Рис. 2. Аппроксимация зашумленного гармонического сигнала линейной комбинацией трех первых функций Уолша

По комплексным амплитудам входного и выходного сигналов определяли параметры вихретокового датчика на разных частотах:

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

$$L = \frac{R U_1}{\omega U_2} \sin(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (2)$$

где r и L — активное сопротивление и индуктивность датчика соответственно; U_1 и φ_1 — амплитуда и начальная фаза входного сигнала; U_2 и φ_2 — амплитуда и начальная фаза выходного сигнала; ω — циклическая частота входного сигнала; R — сопротивление нагрузки (применялось $R = 49,9$ Ом).

Полученные экспериментальные данные использовались для построения годографов, приведенных на рисунке 3 (квадратные точки — исходные от-

ожженные образцы, треугольные точки — образцы, подвергнутые закалке). На рисунке 2а представлены результаты расчетов для серии исходных образцов из сплавов алюминия при отсутствии зазора между поверхностью материала и датчиком. На рисунке 2b приведены усредненные данные для двух групп образцов — исходных и прошедших термообработку — также при отсутствии зазора. Видно, что соответствующие точки сдвинуты друг относительно друга, но остаются на одной и той же кривой. Отметим, что данные рисунка 2b позволяют различить образцы, прошедшие и не прошедшие термообработку. На рисунке 2с — d изображены результаты расчетов для измерений с зазорами 0,09 мм (рис. 2с) и 0,18 мм (рис 2d). Приведенные годографы показывают, что точки, изображающие две разные группы образцов, расходятся по двум различным кривым, причем это расхождение тем больше, чем шире зазор.

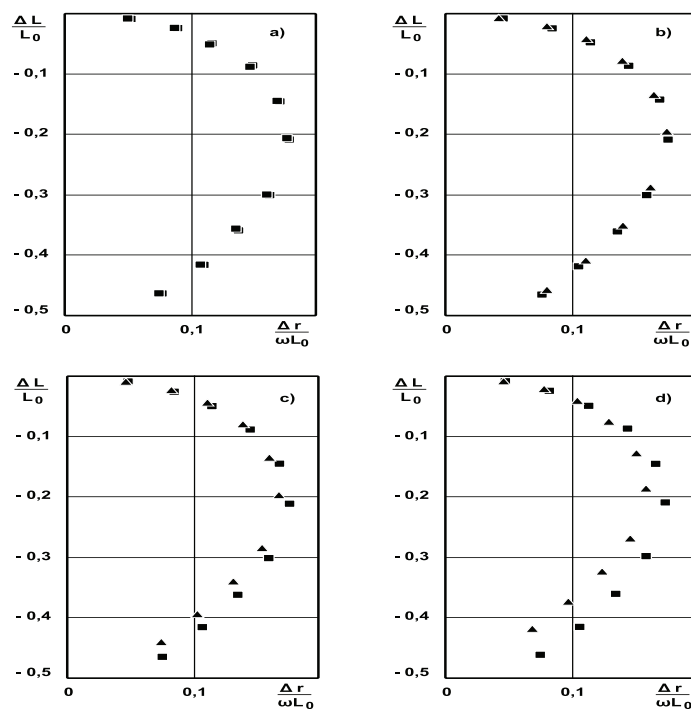


Рис. 3. Экспериментальные годографы алюминиевого сплава (а — измерения без зазора, образцы без термообработки; б — измерения без зазора, исходные и закаленные образцы; с — зазор между датчиком и образцом 0,09 мм; д — зазор между датчиком и образцом 0,18 мм)

Полученные результаты показывают, что предложенная методика обработки результатов измерений обеспечивает достаточно надежное построение годо-

графов. Это делает ее перспективной для проведения многопараметрического контроля изделий из алюминиевых сплавов.

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / контроль / Ю. К. Федосенко, В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский и др. — М., 2003.

2. Дорофеев А. Л., Казаманов Ю. Г. Электромагнитная дефектоскопия. — М., 1980.
3. Поляков В. В., Егоров А. В. Вихретоковый контроль удельной электрической проводимости и магнитной проницаемости изделий из магнитомягких материалов // Дефектоскопия. — 1992. — № 12.
4. Поляков В. В., Головин А. В., Егоров А. В., Утемов М. А. Корреляционные связи между акустическими и физико-механическими характеристиками пористых металлов // Дефектоскопия. — 1994. — № 9.
5. Егоров А. В., Поляков В. В. Применение метода акустической эмиссии к исследованию деформационного поведения структурно-неоднородных материалов: монография. — Барнаул, 2008.
6. Кучерявский С. В., Поляков В. В. Применение методов анализа многомерных данных к исследованию структуры материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2007. — Т. 73, № 8.
7. Плотников В. А., Макаров С. В., Потеев А. И. Высокотемпературная пластическая деформация и акустическая эмиссия алюминия в слабоустойчивом состоянии // Известия вузов. Физика. — 2013. — Т. 56, № 6.
8. Залманзон Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хара и их применение в управлении, связи и других областях. — М., 1989.