

Многочастотная вихретоковая дефектоскопия алюминиевых сплавов

Егоров А.В.¹, Поляков В.В.¹, Колубаев Е.А.², Пирогов А.А.¹

¹ Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

² Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук (Томск, Россия)

Multi-Frequency Eddy Current Testing of Aluminum Alloys

A.V. Egorov¹, V.V. Polyakov¹, A.E. Kolubaev², A.A. Pirogov¹

¹ Altai State University (Barnaul, Russia)

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

Рассмотрен экспериментальный метод неразрушающей диагностики структуры металлических материалов, основанный на использовании многочастотных вихретоковых измерений. При измерениях применялся накладной параметрический датчик, для уменьшения погрешности проводилась цифровая обработка сигналов с помощью функций Уолша. На примере алюминий-магниевого сплава описано получение экспериментальных годографов. Исследовано влияние на вид годографа специально созданных дефектов структуры, моделирующих подповерхностные дефекты (полости, трещины) с различной глубиной залегания в объеме материала от контролируемой поверхности. Количественно описано смещение линий годографа для различных дефектов относительно линий для бездефектной области. Приведены зависимости величины этого смещения от расстояния между дефектом и датчиком, позволяющие локализовать расположение дефекта и оценить глубину его залегания. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности предложенного метода для диагностики и контроля дефектов структуры в изделиях из алюминиевых сплавов.

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

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.2-30

Метод вихревых токов позволяет эффективно проводить неразрушающий контроль различных видов дефектов в изделиях из металлов и сплавов (трещин,

In the paper we discuss an experimental method of non-destructive diagnostics of metallic materials structures based on multi-frequency eddy current measurements. The measurements are performed with a consignment parametric sensor, and further digital signal processing using Walsh functions is carried out for error reduction. Hodograph plotting is described on a set of examples of aluminum-magnesium alloys. We investigate the influence of artificially created structural defects simulating sub-surface defects (cavities, cracks) at different depths of a testing material on the hodograph forms. A quantitative description of hodograph locus shift for various defects in relation to hodograph line of defect-free region is provided. The dependence of the shift on the distance from the sensor to a defect allows to locate the defect and to estimate its depth. The obtained results demonstrate the prospects of the proposed method for diagnosis and monitoring of structural defects in aluminum alloys products.

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

внутренних полостей и т.д.) [1–7]. Наибольшая информативность метода может быть достигнута на основе анализа годографов системы «датчик — образец»,

* Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного Министерством образования и науки РФ (дог. № 02.//G//25.31.0063).

получаемых с помощью многочастотных измерений. Достоинством такого подхода является возможность разделить различные факторы, одновременно влияющие на результаты вихретоковых измерений. Данное разделение обеспечивается тем обстоятельством, что изменения в структуре и химическом составе материала, в режимах измерений и значениях мешающих факторов по-разному влияют на вид линий годографа. В настоящей работе исследуются возможности такого подхода для контроля подповерхностных дефектов в алюминиевых сплавах.

Вихретоковая дефектоскопия осуществлялась с помощью автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса, включавшего в себя датчик, устройства сопряжения и управляющий компьютер [8]. При испытаниях использовался параметрический датчик накладного типа, который представлял из себя катушку индуктивности, помещенную в ферритовый магнитопровод полубронезового типа, с эффективным диаметром 15 мм. Для построения экспериментальных годографов проводились измерения импеданса датчика на основе определения комплексной амплитуды напряжения и тока.

Расчет параметров датчика проводился по формулам

$$L = \frac{R U_{10}}{\omega U_{20}} \sin(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (1)$$

$$r = R \left(\frac{U_{10}}{U_{20}} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - 1 \right),$$

где L и r — соответственно индуктивность и активное сопротивление вихретокового датчика; R — сопротивление, выполнявшее роль преобразователя тока в напряжение; ω — циклическая частота входного синусоидального сигнала; U_{10} и φ_1 — амплитуда и начальная фаза входного сигнала; U_{20} и — амплитуда и начальная фаза сигнала, снимаемого с сопротивления R .

Для уменьшения погрешности измерений использовалась цифровая обработка получаемых сигналов [9]. Эта обработка заключалась в том, что мгновенные значения сигнала аппроксимировались линейной комбинацией трех первых функций Уолша [10]

$$y(x) = b_0 \text{wal}(0, x) + b_1 \text{wal}(1, x) + b_2 \text{wal}(2, x), \quad (2)$$

где $\text{wal}(0, x)$, $\text{wal}(1, x)$, $\text{wal}(2, x)$ — первая, вторая и третья функции Уолша соответственно, $x = t/T$ — относительное время, T — период сигнала, коэффициенты

$$b_0 = U_0; \quad b_1 = \frac{2U_m}{\pi} \cos \varphi_0; \quad b_2 = \frac{2U_m}{\pi} \sin \varphi_0, \quad (3)$$

где U_0 — постоянное напряжение смещения; U_m — амплитуда гармонического сигнала; φ_0 — начальная фаза; значения коэффициентов b_0 , b_1 и b_2 определялись путем обработки опытных данных методом наименьших квадратов.

Результаты измерений представлялись в виде годографов, которые строились в координатах « $\Delta L / L_0 - \Delta R / \omega L_0$ », где $\Delta L = L - L_0$ — изменение реактивного сопротивления датчика при наличии образца, $\Delta R = r - r_0$ — изменение активного сопротивления датчика при наличии образца, L_0 , r_0 — соответственно, индуктивность и активное сопротивление датчика без образца. Годографы рассчитывались по серии экспериментальных точек, каждая из которых соответствовала фиксированной частоте от 100 Гц до 6,4 кГц.

Испытания проводились для сплавов алюминия, широко распространенных в качестве авиационных конструкционных материалов [11]. При измерениях использовались образцы, специально приготовленные из плоских листов алюминий-магниевого сплава АМГ5. Для определения возможностей контроля подповерхностных дефектов (полостей, трещин) в объеме материала эти дефекты моделировались параллельными надрезами, расположенными на различной глубине залегания от внешней поверхности пластины. Схема измерений приведена на рисунке 1. Толщина образцов составляла 5,0 мм, ширина надрезов — 1,0 мм, глубина залегания надрезов 2, 3, 4 составляла, соответственно, 1,0; 2,0 и 4,0 мм.

На рисунке 2 представлены результаты измерений в сопоставлении экспериментальных годографов для бездефектной области контроля, соответствующей

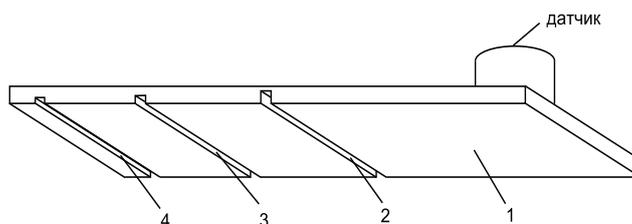
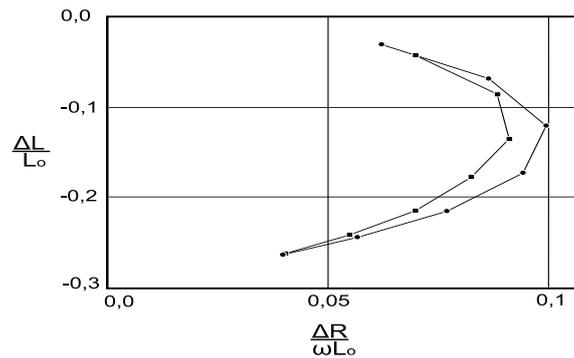
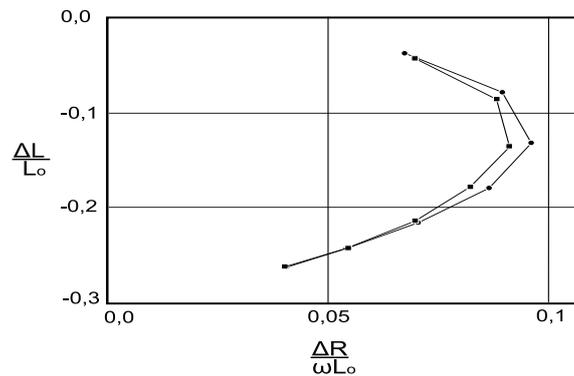


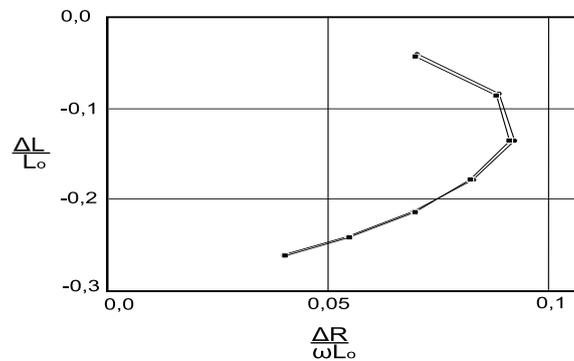
Рис. 1. Схема измерений: 1 — бездефектная область; 2, 3, 4 — подповерхностные дефекты с различной глубиной залегания от контролируемой поверхности



а



б



в

Рис. 2. Сопоставление экспериментальных годографов для бездефектной области и области над дефектом:
 а — для дефекта 2; б — для дефекта 3; в — для дефекта 4.
 Кривые слева — бездефектная область 1; кривые справа — область над дефектом

положению 1 на рисунке 1 (кривые слева), с годографами, описывавшими положение датчика непосредственно над дефектами 2, 3, 4 (кривые справа). Как следует из рисунков 2а, 2б, при глубинах залегания дефектов до 2 мм от поверхности контроля они надежно диагностировались по расхождению линий годографа, относящихся к бездефектной области и к зоне над дефектом. Наблюдаемое расхождение было тем больше, чем ближе к поверхности располагался дефект, что позволяло по величине расхож-

дения оценивать глубину залегания. При дальнейшем увеличении расстояния от поверхности до дефекта разделение линий годографов становилось незначительным, приведенные на рисунке 2с результаты позволяют оценить чувствительность метода.

Смещение линии годографа для дефектной зоны от положения, соответствующего бездефектной области, существенно зависит от расстояния между датчиком и зоной дефекта. Эту зависимость иллюстрирует рисунок 3, на котором для случая

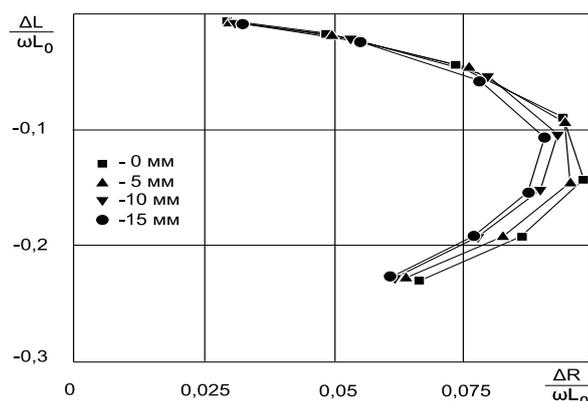


Рис. 3. Влияние на вид годографа расстояния от центра датчика до области над дефектом

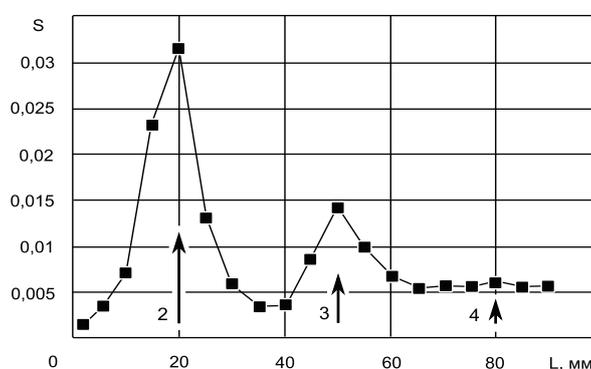


Рис. 4. Смещение линии годографа для дефектов с различной глубиной залегания.
 Расстояние от контролируемой поверхности до дефекта:
 2 — 1 мм, 3 — 2 мм, 3 — 4 мм

дефекта 2 сопоставлены годографы, полученные для различных расстояний от центра датчика до линии на контролируемой поверхности, соответствующей середине надреза. На рисунке 2 видно, что удаление датчика от зоны надреза приводит к монотонному приближению линий годографа к линии, описывающей бездефектную область. Влияние расстояния до зоны дефекта меньше для центральных и нижних участков годографов, описывающих более высокие частоты и, соответственно, меньшую величину скин-слоя. Приведенные результаты свидетельствуют, что по величине смещения годографа можно достаточно надежно локализовать область подповерхностного дефекта.

В качестве количественной характеристики, описывающей смещение всех участков линии годографа, может быть использована величина S , находящаяся как

$$S = \sqrt{\sum s_i^2}, \quad (4)$$

где s_i — отклонение точек годографа при одной и той же фиксированной частоте от исходного значения,

соответствующего бездефектной области. Эта величина рассчитывалась по серии экспериментальных годографов, определявшихся в соответствии с приведенной на рисунке 1 схемой измерений при движении датчика из области 1 по прямой, перпендикулярной линии дефектов 2, 3, 4. Результаты вычислений приведены на рисунке 4 в виде зависимости S от расстояния l , измеряемого от центра датчика в бездефектной области до центра датчика в месте контроля. Как следует из рисунка 4, полученная зависимость характеризуется тремя максимумами, приходящимися на линии надрезов (отмеченные стрелками). Величина максимума тем больше, чем ближе к поверхности расположен надрез, что предоставляет возможность для количественной оценки глубины залегания дефектов.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о перспективности описанного в работе подхода, основанного на применении многочастотной вихретоковой дефектоскопии, для диагностики и контроля дефектов структуры в изделиях из алюминиевых сплавов.

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: в 2 кн. // Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский и др. Вихретоковый контроль: Кн. 2. — М., 2003.
2. Поляков В.В., Егоров А.В. Вихретоковый контроль удельной электрической проводимости и магнитной проницаемости изделий из магнитомягких материалов // Дефектоскопия. 1992. — №12.
3. Sasi B., Rao V.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, № 2.
4. 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.
5. Поляков В.В., Егоров А.В. Магнитные и электрические характеристики пористых ферромагнетиков // Доклады Академии наук. — 1995. — Т. 344, №4.
6. García-Martín J., Gómez-Gil J., and Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. Sensors (Basel). — 2011. — Vol. 11(3).
7. Поляков В.В., Головин А.В., Егоров А.В., Утемесов М.А. Корреляционные связи между акустическими и физико-механическими характеристиками пористых металлов // Дефектоскопия. — 1994. — №9.
8. 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.
9. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2 т. — М., 1983. — Т. 1,2.
10. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Волша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. — М., 1989.
11. Sikora R., Chady T., Gratkowski S., Komorowski M., and Stawicki K. Eddy current testing of thick aluminum plates with hidden cracks. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation: Vol. 22. AIP Conference Proceedings, 2003. — Vol. 657.