

Akhverdiev Kamil Samedovich, doctor of technical sciences, professor, vm@rgups.ru, Russia, Rostov-on-Don, Rostov State Transport University,

Bolgova Ekaterina Alexandrovna, postgraduate, bolgova_katya6@mail.ru, Russia, Rostov-on-Don, Rostov State Transport University,

Lagunova Elena Olegovna, doctor of technical sciences, docent, head of the department, lagunova@rambler.ru, Russia, Rostov-on-Don, Rostov State Transport University,

Kopotun Elena Alexandrovna, candidate of technical sciences, docent, lenakopotun@yandex.ru, Russia, Rostov-on-Don, Rostov State Transport University

УДК 620.179.14

DOI: 10.24412/2071-6168-2024-1-466-467

ДЕФЕКТОСКОПИЯ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Ю.А. Захаренко, А.П. Морозова, Д.С. Чуваева,
В.Н. Маликов, С.А. Войнаш, В.А. Марков, В.А. Соколова

Разработан сверхминиатюрный вихретоковый преобразователь (ВТП) трансформаторного типа, позволяющий исследовать различные неоднородные материалы, сплавы, миниатюрные детали, печатные платы, микроскопические дефекты. Приведена структурная схема датчика и указаны основные технические характеристики, обеспечивающие локализацию магнитного поля на участках порядка 50 мкм×50 мкм. Предложена схема использования компьютера в качестве генератора и приемника сигналов с обмоток. Разработанная измерительная система позволяет устранить основной недостаток вихретоковых преобразователей – малую локализацию электромагнитного поля и одновременно добиться значительного снижения уровня помех за счет использования высококачественных усилителей и фильтров. Использование персонального компьютера позволяет автоматически производить изменение частоты среза фильтрации и рабочей частоты прибора. Разработанный прибор позволяет, в частности, производить поиск дефектов в печатных платах, в переходах металл-диэлектрик-металл, в сплавах различных металлов. Описана методика измерений, позволяющая с высокой точностью производить контроль дефектов в различных сплавах. Вихретоковый преобразователь был успешно протестирован на ряде объектов: сплав алюминий-магний толщиной 5,5 мм и сварной шов титановых пластин толщиной 5 мм и других. В статье приведены зависимости, иллюстрирующие зависимость сигнала ВТП от дефектов в данных структурах.

Ключевые слова: вихретоковый преобразователь, сплавы, дефекты, измерительная система.

Вопросы дефектоскопии занимают важное место в современной прикладной физике и индустрии. Титан и его соединения в больших объемах применяются в авиационной технике, судостроении, химической промышленности, в ответственных узлах различных механизмов. Технический титан используется для производства изделий, предназначенных для работы в агрессивных условиях. Некачественные сварные швы титана могут привести к разрушению изделий, изготовленных из этого материала. Сплавы Al-Mg применяются в качестве конструкционных материалов в авиации и космонавтике благодаря удачному сочетанию прочности и легкости. Данные сплавы применяются при производстве скоростных поездов (например, поездов Синкансэн(Япония)) и во многих других отраслях машиностроения. Сплавы Al-Mg применяются в электротехнической, в химической и пищевой промышленности.

В традиционных отраслях промышленности США, например, затраты на контроль качества составляют в среднем 1 – 3% стоимости выпускаемой продукции, а в таких отраслях промышленности, как оборонная, атомная, аэрокосмическая, затраты на контроль качества возрастают до 12 – 20% [1]. В этой связи актуальной задачей представляется разработка вихретоковых измерительных систем, предназначенных для локальных измерений электропроводности в неоднородных материалах, поиска дефектов в сплавах.

Исследования в указанном направлении продолжают развиваться [2-7]. Например, в недавно опубликованной работе [2] авторы проводят сканирование двух алюминиевых пластин с модельным дефектом в центре, а также осуществляют дефектоскопию трещин между пластинами. Диаметр измерительной обмотки в работе составлял 7 мм. Сканирование производилось при частотах в 1 и 5 кГц, глубина проникновения вихревых токов на указанных частотах в исследуемые пластины при этом составляла 3,82 мм и 1,71 мм [2].

В настоящее время развиваются экспериментальные методы с использованием двух вихретоковых преобразователей, работающих в дифференциальном режиме [3]. Подобные схемы включения позволяют значительно уменьшить уровень паразитных шумов, возникающих при скоростном сканировании в реальном времени. Вихретоковый метод контроля в настоящее время активно используется и в медицинской физике [4].

Анализ исследований, проведенных в последнее время, свидетельствует о стремлении к миниатюризации вихретоковых преобразователей. В последнее время разработаны датчики, имеющие размеры 5 мм × 5 мм с диаметром используемой проволоки в 0,15 мм [5]. Однако разработанные датчики не обеспечивают требуемой глубины проникновения и локализации магнитного поля, которые необходимы для локальных измерений в различных неоднородных средах. Для повышения локализации магнитного поля часто применяются концентраторы магнитного поля, изготавливаемые из феррита. Использование подобной конструкции позволяет получить преимущество, связанное с отсутствием рассеивания вихревых токов [6]. При этом удается достичь глубины проникновения в 2,5 мм.

В этой связи возникает задача разработки сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей, обеспечивающих глубину проникновения до 5 мм и локализация в 2500 мкм². Так как вихретоковый метод контроля нечувствителен к непроводящим слоям краски, то его можно использовать и для диагностики деталей с лакокрасочными покрытиями [7].

Конструкция сверхминиатюрного вихретокового преобразователя и измерительной системы. Конструкция измерительной системы включает в себя два дифференциально включенных сверхминиатюрных преобразователя, обеспечивающих высокую локализацию магнитного поля (в пределах 2500 мкм²). Миниатюрные размеры и особая форма сердечника позволяют определять локальную электропроводность материалов в сильно неоднородных средах. В частности, разработанный датчик позволяет отыскивать микроскопические дефекты в неоднородных материалах на глубине до 5 мм благодаря миниатюрным размерам и особой форме сердечников.

Контролируемым параметром является величина электропроводности материала и ее распределение по исследуемому объекту. ВТП подключен к серии разработанных усилителей и полосовых фильтров, управляемых с помощью звуковой карты персонального компьютера, работающего под управлением специального программного обеспечения. Программное обеспечение управляет подачей напряжения на генераторную обмотку преобразователя, а также позволяет считывать значения напряжения с измерительной обмотки первоначально в некоторых условных единицах, которые далее, с учетом предварительной калибровки, переводятся в значения электропроводности.

Возбуждающая обмотка сверхминиатюрного преобразователя состоит из 10 витков, а ее диаметр составляет $0,12 \div 0,13$ мм. Измерительная обмотка состоит из 130 витков и имеет диаметр $0,05 \div 0,08$ мм. С целью минимизации влияния возбуждающей обмотки на регистрируемый сигнал в схему включена компенсационная обмотка, подключенная к измерительной обмотке по известной дифференциальной схеме. Она состоит из 20 витков. Для намотки витков используется медная проволока, имеющая толщину в 5 мкм. Обмотки наматываются на сердечник пирамидальной формы. Предлагаемая форма сердечника благоприятствует локализации магнитного поля. Сердечник изготовлен из феррита со значением начальной магнитной проницаемости 500.

Различные преобразователи, сконструированные на основе сердечников, имеющих одинаковое соотношение диагонали основания (400 мкм) и длины ребра (1 мм), были откалиброваны на образцах с хорошо известной электропроводностью.

Сверхминиатюрный вихретоковый преобразователь представлен на рис.1. Характеристики разработанных преобразователей позволяют эффективно локализовать магнитное поле в пределах 2500 мкм^2 и обеспечивать глубину проникновения магнитного поля в исследуемый объект на глубину до 5 мм [8-10].

Вихретоковый преобразователь (рис.1), представляет собой трансформатор, с измерительной 1, возбуждающей 2, компенсационной 3 обмотками и магнитопроводом 4, который размещается внутри цилиндрической платформы 5, с вырезанными по внешней стороне дорожками для обмоток, которая затем пропитывается компаундом 6 при температуре 200°C , для предотвращения разрушения обмоток при наложении ферритового экрана 7, предназначенного для локализации электромагнитного поля на объекте контроля. Снаружи датчик заключается в корундовую шайбу 8, которая защищает сердечник 4 от контакта с объектом контроля.

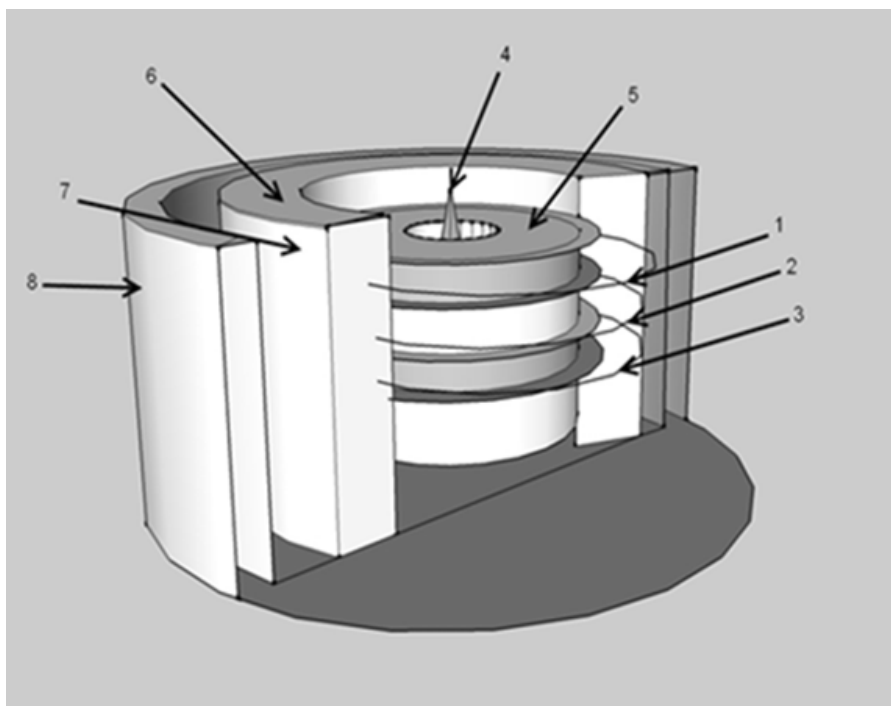


Рис. 1. Схема вихретокового преобразователя

Измерительная система, построенная на основе миниатюрного вихретокового преобразователя, работает следующим образом. Программное обеспечение персонального компьютера управляет работой генератора, который формирует последовательность прямоугольных импульсов напряжения с частотой следования f_1 , необходимой для работы вихретоковых преобразователей. Импульсы напряжения с выхода генератора передаются на два последовательно включенных интегратора, после чего направля-

ются на вход усилителя мощности. С выхода усилителя импульсы напряжения поступают на возбуждающие катушки индуктивности вихретоковых преобразователей. Разность выходных напряжений измерительных катушек преобразователей несет информацию о структурных неоднородностях объекта контроля, находящихся в зоне действия вихретоковых преобразователей. Разность выходных напряжений преобразователей выделяется и усиливается в специальном микрофонном усилителе. Сигнал поступает на амплитудный детектор после прохождения двух последовательно подключенных качественных фильтров низких частот и двух последовательно подключенных селективных усилителя. Далее сигнал через аналого-цифровой преобразователь передается на персональный компьютер. Благодаря одновременному управлению частотой генерируемого сигнала на возбуждающей катушке и частотой среза системы фильтрации, а также селективного усиления происходит выделение полезного сигнала, несущего информацию о распределении электропроводности внутри объекта, в частности, о возможных дефектах объекта. Программное управление позволяет изменять рабочую частоту измерительной системы так, чтобы сигнал, получаемый с измерительной обмотки был надежно зарегистрирован.

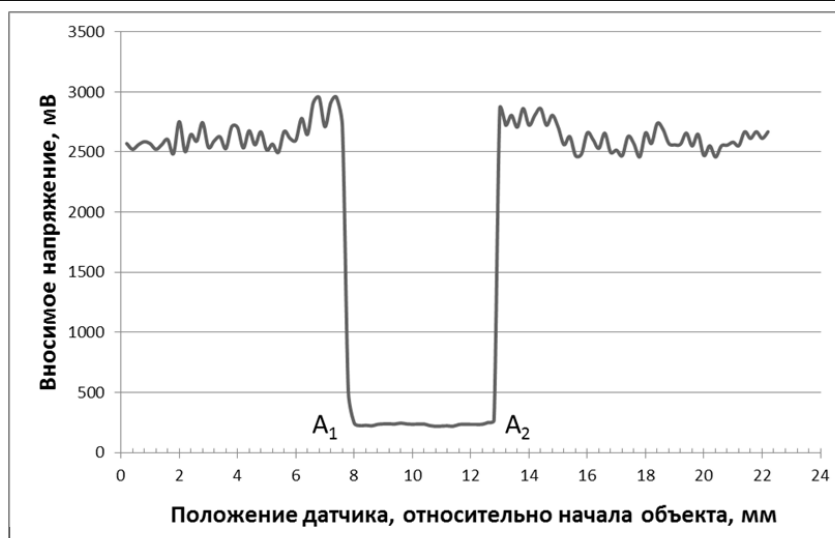
Сканирование сварных швов титановых сплавов. С целью демонстрации работоспособности предлагаемого устройства для определения качества сварных швов титановых сплавов проводилась серия измерений на образцах, представляющих из себя пластины из технического титана марки ВТ1-0, соединенные с помощью сварных швов. Толщина пластин составляла 5 мм. Ширина сварного шва составляла 5 мм.

Перед началом измерений проводилась калибровка датчика, заключающаяся в определении вносимого напряжения с участка, свободного от дефектов. Измеряемая характеристика – напряжение, индуцируемое полем вихревых токов, возникающих в объекте контроля. В данном эксперименте участок для калибровки выбирался на заведомо бездефектной пластине, изготовленной из идентичной пластины титана. Калибровка производилась при различных частотах. Частота варьировалась в диапазоне 500-2000 Гц с шагом в 100 Гц. Дальнейшее сканирование осуществлялось путем перемещения датчика вдоль или поперек сварного шва или поперек области дефектов. В ходе проведения экспериментов было установлено, что оптимальный диапазон частот электромагнитного поля возбуждающей обмотки для исследования титана составляет величину порядка 1500 Гц. С целью определения однородности сварного шва осуществлялось сканирование образцов вдоль поверхности сварного шва. При этом существенного изменения амплитуды сигнала не обнаружено. Результаты эксперимента свидетельствуют в пользу относительно однородной структуры сварного шва, но не несут информации о качестве самого шва. Из результатов данного эксперимента можно лишь заключить о равномерном распределении дефектов сварного шва или о его бездефектности.

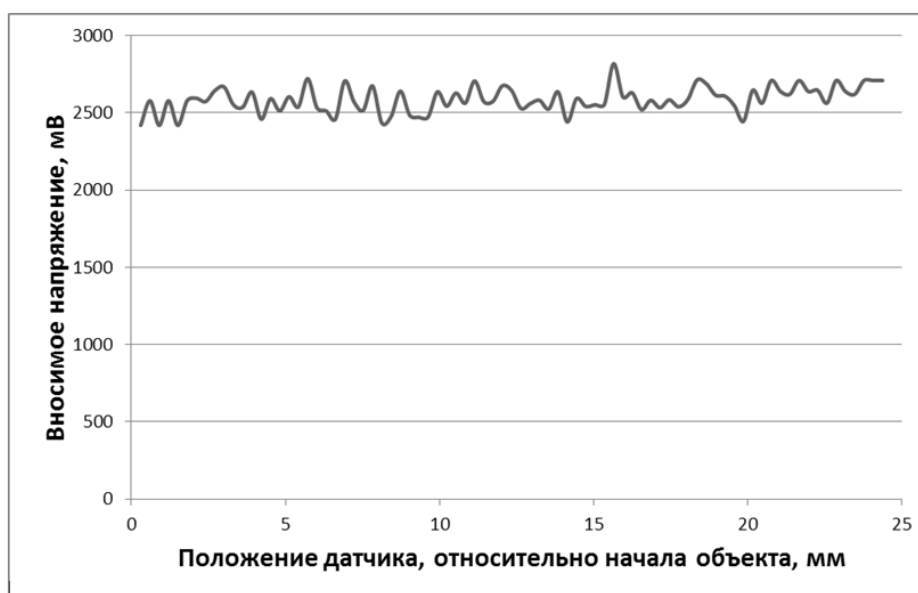
В следующем эксперименте сканирование осуществлялось поперек сварного шва. Длина сварного шва составляла 150 мм. Шов был разбит на 30 областей по 5 мм в каждой из 30 областей так, чтобы снять сигнал, как с самого шва, так и непосредственно с пластин. Полученные зависимости усреднялись. Результаты эксперимента представлены на рис.2а, б.

В образце №1 влияние некачественного сварного шва на вносимое напряжение явно прослеживается по значительному падению амплитуды сигнала в области сварного шва по сравнению с областью пластин.

На основании проведенного эксперимента сделан вывод о низком качестве сварного шва образца №1. Низкое качество сварки было подтверждено и непосредственно при разрезании сварного шва. Сканирование образца №2 показало отсутствие отклонений амплитуды сигнала в пределах сварного шва. Разрезание сварного шва образца №2 показало высокое качество сварки.



*а – Величина отклика при сканировании сварного шва образца №1:
A₁ – A₂ - границы сварного шва*



б – Величина отклика при сканировании сварного шва образца №2

Рис. 2. Величина отклика при сканировании сварного шва

Сканирование сплава алюминий-магний с модельными дефектами. С целью оценки максимальной глубины залегания и линейных размеров дефектов, для нахождения которых целесообразно использовать вихретоковый метод контроля, были подготовлены образцы с модельными дефектами.

Образцы представляли из себя пластины из сплава Al-Mg (Al-94%, Mg-3%). Толщина первой пластины составляла 5,5 мм. В пластине содержалось 3 дефекта в виде прорези толщиной в 1 мм, залегающих на глубине 1, 3 и 4 мм. Толщина второй пластины составляла 5,5 мм. В пластине содержалось 6 дефектов в виде прорези толщиной в 0,25 мм, залегающих на глубине 1, 2, 3, 4, 5 и 5,3 мм.

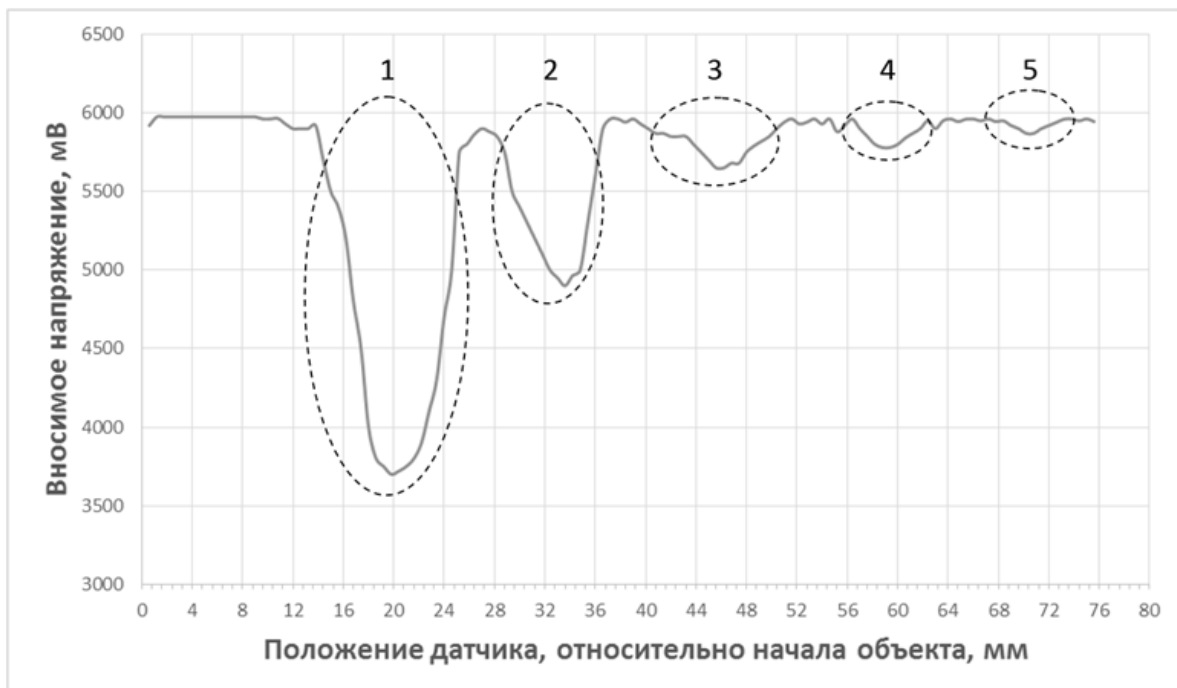
С целью определения чувствительности датчика к дефектам, залегающим в глубине металла осуществлялось сканирование с бездефектной стороны образца.

При проведении экспериментов с первой пластиной величина вносимого напряжения на возбуждающую обмотку преобразователя составляла 2 В.

Результаты исследований первой пластины с дефектами, имеющими толщину 1 мм, при частоте 500 Гц и амплитуде сигнала в 2 В позволили явно обнаружить все 3 прорезы по падению амплитуды сигнала (рис.3). Падение амплитуды сигнала на первом дефекте составляла величину порядка 0,75 В, на втором – 0,2 В, на третьем – 0,1 В.



Рис. 3. Результаты сканирования пластины №1: 1, 2, 3 – номера дефектов



а – Результаты сканирования пластины №2 с включенной системой фильтрации и селективного усиления

Рис. 4. Результаты сканирования пластины №2 (начало)



*б – Результаты сканирования пластины №2
без системы фильтрации и селективного усиления*

Рис. 4. Результаты сканирования пластины №2 (окончание)

Результаты исследования второй пластины при частоте 500 Гц и амплитуде сигнала 3В позволили обнаружить пять дефектов (рис.4(а)). Падение амплитуды сигнала на первом дефекте составляло 2,5 В, на втором дефекте – 1 В, на третьем дефекте – 0,4 В, на четвертом – 0,2 В, на пятом – 0,1 В. Изменения отклика сигнала при прохождении над шестым дефектом не зафиксировано в силу его малой величины. Рис. 4(б) показывает целесообразность использования системы усилителей и полосовых фильтров при поиске дефектов глубокого залегания. Дефекты, лежащие на глубине 3 мм и более, практически незаметны на фоне помех.

Результаты эксперимента показывают эффективность разработанной измерительной системы для поиска дефектов толщиной от 0,25 мм, залегающих на глубине до 5 мм.

Заключение. Разработанная измерительная система, основанная на сверхминиатюрных вихретоковых преобразователях, позволяет добиться большей локализации электромагнитного поля в сравнении с известными ранее аналогичными системами.

Пирамидальная форма сердечника, система полосовых фильтров и наличие селективного усиления позволили существенно снизить уровень помех и добиться значительной глубины проникновения вихревых токов в исследуемый объект. Разработанные ВТП позволяют эффективно производить сканирование сварных швов титановых сплавов и анализировать их качество. Сканирование дефектов в алюминиевых сплавах позволяет обнаруживать дефекты с линейными размерами порядка 100 мкм, лежащими на глубине до 5 мм. Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать измерения и производить оперативное изменение рабочей частоты прибора.

Список литературы

1. Семенов В.С. Рябцев А.П., Мудров А.Е.. Электромагнитные методы дефектоскопии и контроля в СФТИ и Томском госуниверситете // Вестник ТГУ. 2003.№ 278. С. 48-54.2.Barbato L., Poulakis N., Tamburrino A., and Theodoulidis T., Ventre S. Solution

and Extension of a New Benchmark Problem for Eddy Current Nondestructive Testing // IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. 2015. 51(7):1-1.

3.Rocha J., Ramos H.G., Ribeiro A.L, Pasadas D.J. Magnetic Sensors Assessment in Velocity Induced Eddy Current Testing // Sensors and Actuators A: Physical Vol. 228, No 1, pp. 55 - 61, June, 2015.

4. Патент №2231287 РФ. Вихретоковый локатор инородных тел / Литвиненко А.А. № 2002123541/14; заявл. 03.09.2002; опубл. 27.06.2004. Бюл. № 18.

5.Prance R.J., Clark T.D. and Prance H. Ultra low noise induction magnetometer for variable temperature operation // Sensors Actuators. 2000. 85 (1-3) 361–364.

6.Prance R.J., Clark T.D. and Prance H. Compact room-temperature induction magnetometer with superconducting quantum interference level field sensitivity // Rev. Sci. Instrum. 2003. 74, 3735–3739.

7.Polyakov V.V., Dmitriev S.F., Ishkov A.V., Kolubaev E.A. and Malikov V.N. Non-destructive testing of aluminium alloys by using miniature eddy-current flaw transducers // Advanced Materials Research. 2014. Volume 880. Pp. 105-108

8.Malikov V.N., Dmitriev S.F., Sagalakov A.M. and Ishkov A.V. Subminiature Eddy Current Transducers for Studying Metal-Dielectric Junctions. Instruments and experimental techniques. 2014. Vol. 57. No.6. Pp. 751-754.

9.Dmitriev S.F., Ishkov A.V., Malikov V.N., Sagalakov A.M. and Katasonov A.O. Non-destructive testing of the metal-insulator-metal using miniature eddy current transducers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 71 (2015) 012065.

10. Дмитриев С.Ф., Ишков А.В., Маликов В.Н., Сагалаков А.М. Сверхминиатюрные токовихревые преобразователи для исследования переходов металл-диэлектрик // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 6. С. 102-106.

Захаренко Юлия Александровна, студент, zaharenko@mc.asu.ru, Россия, Барнаул, Алтайский государственный университет,

Морозова Анастасия Павловна, студент, morozovarffi@gmail.com, Россия, Барнаул, Алтайский государственный университет,

Чуваева Дарья Олеговна, студент, Leisrffi@gmail.com, Россия, Барнаул, Алтайский государственный университет,

Маликов Владимир Николаевич, канд. техн. наук, доцент, osys11@gmail.com, Россия, Барнаул, Алтайский государственный университет,

Войнаш Сергей Александрович, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, sergey_voi@mail.ru, Россия, Казань, Казанский федеральный университет,

Марков Виктор Александрович, канд. техн. наук, доцент, tactor85@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,

Соколова Виктория Александровна, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, sokolova_vika@inbox.ru, Россия, Казань, Казанский федеральный университет

FLAW DETECTION OF ALLOYS USING THE EDDY CURRENT METHOD

*Yu.A. Zakharenko, A.P. Morozova, D.S. Chuvaeva,
V.N. Malikov, S.A. Voinash, V.A. Markov, V.A. Sokolova*

A subminiature eddy current transducer (ECT) of a transformer type has been developed, which makes it possible to study various inhomogeneous materials, alloys, miniature parts, printed circuit boards, and microscopic defects. A block diagram of the sensor is presented and the main technical characteristics are indicated that ensure localization of the magnetic field in areas of the order of 50 micron×50 micron. A scheme for using a computer as a generator and receiver of signals from the windings is proposed. The developed measuring system allows us to eliminate the main disadvantage of eddy current transducers - low localization of the electromagnetic field and at the same time achieve a significant reduction in the level of interference through the use of high-quality amplifiers and filters. Using a personal computer allows you to automatically change the filtering cutoff frequency and the operating frequency of the device. The developed device allows, in particular, to search for defects in printed circuit boards, in metal-dielectric-metal junctions, and in alloys of various metals. A measurement technique is described that makes it possible to monitor defects in various alloys with high accuracy. The eddy current transducer has been successfully tested on a number of objects: a 5.5 mm thick aluminum-magnesium alloy and a welded seam of 5 mm thick titanium plates and others. The article presents dependencies illustrating the dependence of the ETC signal on defects in these structures.

Key words: eddy current transducer, alloys, defects, measuring system.

Zakharenko Yulia Aleksandrovna, student, zaharenko@mc.asu.ru, Russia, Barnaul, Altai State University,

Morozova Anastasia Pavlovna, student, morozovarffi@gmail.com, Russia, Barnaul, Altai State University,

Chuvaeva Daria Olegovna, student, Leisrffi@gmail.com, Russia, Barnaul, Altai State University,

Malikov Vladimir Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, osys11@gmail.com, Russia, Barnaul, Altai State University,

Voinash Sergey Aleksandrovich, junior researcher at the research laboratory, sergey_voi@mail.ru, Russia, Kazan, Kazan Federal University,

Markov Viktor Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, mactor85@mail.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,

Sokolova Viktoriia Aleksandrovna, candidate of technical sciences, docent, leading researcher at the research laboratory, sokolova_vika@inbox.ru, Russia, Kazan, Kazan Federal University