

О ДЕФЕКТОСКОПИИ МНОГОСЛОЙНЫХ МАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ AL-(ПЭНД-AL)X-AL

- Выпуск №2. – Режим доступа: <http://processes.open-mechanics.com/articles/359.pdf>
2. Способ газификации твердого топлива [Текст]: пат. 2473669 Рос. Федерации: МПК C10J3/84 (2006.01), B01J19/10 (2006.01) / Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Хмелев М.В., Шалунова К.В., Галахов А.Н.; заявл. 03.08.2011; опубл. 27.01.2013.
3. Хмелев, В.Н. Разработка оборудования ультразвукового пеногашения и определение его функциональных возможностей/ В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.Н. Галахов // Электронный журнал Техническая акустика [Электронный ресурс]. – 2011. - Т. 11. – Режим доступа: <http://www.ejta.org/ru/khmelev8>.
4. Vladimir N. Khmelev Studies of ultrasonic dehydration efficiency [Текст]/ V. N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.V. Barsukov, D.S. Abramenco, A.N. Lebedev // Journal of Zhejiang University – Science A. – 2011. - Vol. 12. – p. 247-254.
5. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей [Текст]: монография / В.Н. Хмелев [и др.] – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 241 с.
6. Хмелев, В.Н. Исследование акустической коагуляции аэрозоля, переносимого потоком воздуха [Текст]/ В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, Р.Н. Голых // Ползуновский вестник. – 2011. - №4/1. – с. 211-216.
7. Хмелев, В.Н. Особенности проектирования электронных генераторов для излучателей, предназначенных для воздействия на газовые среды [Текст]/ В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, А.В. Шалунов, Д.С. Абраменко, Д.В. Генне, А.Д. Абрамов // Известия томского политехнического университета. – 2010. - Т. 316. №4
8. Хмелев, В.Н. Согласование электронных генераторов с пьезоэлектрическими колебательными системами для повышения эффективности ультразвуковых аппаратов [Текст]/ В.Н. Хмелев, Д.В. Генне, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов, Д.С. Абраменко // Известия Томского политехнического университета. – 2010. - Т. 317. № 4. – С. 139-143.
9. Мэзон, У. Физическая Акустика [Текст] т.2. Методы и приборы ультразвуковых исследований / Под ред. У. Мэзона – М.:Мир, 1966. – 592с.
10. Донской, А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки [Текст]/ А.В. Донской, О.К. Келлер, Г.С. Кратыш. – 2-е изд., перераб. и доп.– Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 208с, ил.
11. Способ управления процессом ультразвуковой липосакции [Текст]: пат. 2240073 Рос. Федерации: МПК7 A61B18/00, A61B17/32 / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Сливин А.Н., Шалунов А.В; заявл. 13.03.2003; опубл. 20.11.2004.
12. Ультразвуковой аппарат серии «Соловей» [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.usonic.com/catalog/apparatus_dlya_uskoreniya_protsessov_v_gazovykh_sredakh/ultrazvukovoy_apparat_serii_solovey/
- Д.т.н., проф., В.Н. Хмелев – vnh@btu.secna.ru; к.т.н., доцент, Р.В. Барсуков – roman@btu.secna.ru; аспирант Е.В. Ильченко – iev@btu.secna.ru; Ведущий инженер лаборатории кафедры методов и средств измерений и автоматизации Д.В. Генне – gdv@btu.secna.ru; к.т.н.доцент Д.С. Абраменко – ades@btu.secna.ru, (3854)43-25-70 – Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова"

УДК: 620.179.118.415.05

О ДЕФЕКТОСКОПИИ МНОГОСЛОЙНЫХ МАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ AL-(ПЭНД-AL)X-AL МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

В.В. Поляков, С.Ф. Дмитриев, А.В. Ишков, Г.Е., Руденский, Е.А., Колубаев, В.Н. Маликов

В статье описаны результаты исследований визуальных образов дефектов в виде несплошностей, смо-делированных в металлополимерных слоистых композитах системы Al-(ПЭНД-Ме)n-Al, вплоть до 10-слойного композита. Образы модельных дефектов получены Фурье-преобразователем прибора ИЭНМ-5ФА. Экспериментально обнаружена отстройка от зазора у дефектоскопа при использовании в качестве датчика сверхминиатюрного вихреветокового преобразователя (СМВТП).

Ключевые слова: неразрушающий контроль, металлополимерный композит, дефект, метод вихревых токов.

Введение

Метод вихревых токов (**МВТ**), наряду с ультразвуковыми и рентгеноскопическими исследованиями, является одним из основных неразрушающих методов контроля различных материалов и изделий в современной

технике. Метод основывается на исследовании взаимодействия электромагнитного поля специального датчика – вихреветокового преобразователя (**ВТП**) и исследуемого объекта. В зависимости от поставленных целей, свойств контролируемого объекта, природы и тополо-

В.В. ПОЛЯКОВ, С.Ф. ДМИТРИЕВ, А.В. ИШКОВ, Г.Е., РУДЕНСКИЙ, Е.А., КОЛУБАЕВ, В.Н. МАЛИКОВ 133

РАЗДЕЛ 3. КОМПОНЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

гии выявляемых с помощью МВТ дефектов, меняется конструкция таких датчиков и принципы, положенные в основу самой дефектоскопии [1]. Так, например, для определения толщины проводящих и диэлектрических покрытий на различных основаниях, а также для исследования свойств проводящих неферромагнитных материалов, коррелирующих с проводимостью, ВТП чаще всего выполняют по схеме трансформаторных датчиков накладного типа, содержащих как минимум две катушки: передающую или возбуждающую - наводящую переменное магнитное поле в исследуемом образце и возбуждающую в нем вихревые токи, и, приемную или измерительную - фиксирующую противополе вихревых токов.

В зависимости от заложенных в конструкцию дефектоскопа параметров и предъявляемых к нему требований (тип чувствительного к дефектам параметра материала, локальность ВТП, расположение, протяженность и ширина раскрытия дефекта и пр.), электрические характеристики датчика и его конструкцию приходится постоянно изменять под конкретную задачу, так как основной информативный параметр этого метода - напряжение, вносимое в измерительную обмотку ВТП, - зависит от обобщенной характеристики датчика β_0 , которая, в свою очередь, является функцией природы материала, вида и параметров дефекта, параметров и конструкции ВТП, а также частоты возбуждающего переменного электромагнитного поля.

В настоящее время среди объектов неразрушающего контроля особое место занимают металлополимерные слоистые композиты (**МПСК**). Простейшие МПСК - это, например, листовые материалы облицовочных панелей, сотовые панели, щиты звуко- и теплоизоляции самолетов, отражающие радиацию покрытия оборудования и приборов, декоративные металлопластиковые панели, материалы для изготовления печатных плат и другие подобные композиты, содержащие от одного до двух и более металлических слоев, разделенных диэлектрическими прослойками. К МПСК относятся и широко используемые в быту металлопластиковые трубы, в которых металлический, алюминиевый слой композита находится между слоями сшитого полиэтилена высокого или низкого давления (**ПЭВД, ПЭНД**) различной толщины [2].

Дефектоскопия МПСК осуществляется для определения следующих типовых дефектов: нарушений сплошности металлического

и(или) полимерного слоя, количество и толщина слоев, проводящие и непроводящие перемычки между слоями, деформация поверхности металлического слоя, изменение состояния границы раздела между металлическими и полимерными слоями МПСК. При этом одним из универсальных параметров, чувствительным ко всем перечисленным дефектам МПСК, является величина локальной электропроводности материала и ее распределение по поверхности, связанная с топологией электромагнитного поля в материале, взаимодействующего с указанными дефектами [3].

Ранее мы сообщали об успешной разработке и тестировании виртуализированного измерительного прибора - измерителя электропроводности неферромагнитных материалов, оснащенного Фурье-анализатором входного сигнала - ИЭНМ-5ФА [4]. В качестве датчика в этом приборе применен сверхминиатюрный ВТП (**СМВТП**) оригинальной конструкции, выполненный по дифференциальной схеме включения катушек трансформаторного ВТП и позволяющий локализовать область контроля вплоть до 50 мкм^2 и ниже. Измерение локальной электропроводности на поверхности контролируемого образца с одновременной визуализацией АЧХ сигнала приемной катушки СМВТП в режиме реального времени и сопоставление данных, полученных на контролируемом объекте с образом дефекта, предварительно полученным на модели материала, позволяют использовать этот прибор в режиме дефектоскопа.

Целью настоящей работы явилось исследование возможности обнаружения дефектов типа несплошности в МПСК на основе алюминия и ПЭНД типа $\text{Al-(ПЭНД-Ме)}_n\text{-Al}$, а также визуализация образов таких дефектов с помощью прибора ИЭНМ-5ФА.

Экспериментальная часть

Для проведения исследований использовали прибор ИЭНМ-5ФА, производства ООО «НПФ «Гамма-Тест», г. Барнаул (зав. № 0005), оснащенный беспроводным ручным СМВТП с локальностью $0,1\text{--}0,5\text{мм}^2$.

Программная часть ИЭНМ-5ФА устанавливалась на персональный компьютер, функционирующий под управлением ОС Windows XP, беспроводная связь между прибором и датчиком осуществлялась посредством Bluetooth через адаптер F1 (КНР), длина линии связи 2-3м. На передающую катушку СМВТП подавалось напряжение величиной 3,5-4,5В, частотой 0,3-300кГц. Абсолютная калибровка прибора и линии связи с датчиком осуществля-

МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

лялась по государственному стандартному образцу (ГСО) меди марки 3435-89П-3446-89П - 415Мсм/м (ГОСТ 27333-87).

МПСК и модели их дефектов изготавливали чередованием слоев алюминиевой фольги (ГОСТ 745-2003), толщиной 20-100 мкм со слоями пленки из ПЭНД марки М, толщиной 20мкм (ГОСТ 10354-82) или со слоями парафинированной бумаги (ГОСТ 9569-2006), толщиной 50-100мкм.

Из указанных материалов вырезали образцы размером 20*50мм, формировали пакет заданного строения, вкладывали слой фольги или диэлектрика с дефектом и осуществляли его прессование при температуре 110-120°C и давлении 5-10МПа в течение 3-5 мин.

Дефекты строения МПСК моделировали пропуском или увеличением количества отдельных слоев, а дефекты сплошности и перемычек - вырубанием в фольге или слое диэлектрика круглого или прямоугольного отверстия. Толщину слоев и полученного пакета МПСК контролировали микрометром МК 25 (ГОСТ 6507-90).

Результаты и их обсуждение

Основной характеристикой МПСК, чувствительной к дефектам исследованного типа, является электропроводность материала металлического слоя. Как было показано ранее [5], она входит в неоднородное уравнение Гельмгольца для векторного потенциала поля вихревых токов многослойной среды, наряду с магнитной проницаемостью материала, и стремится с значению этого параметра для сплошного объемного материала по мере увеличения количества слоев в МПСК и уменьшения толщины диэлектрических прослоек. При этом вклад в величину напряжения, вносимого в измерительную обмотку СМВТП с высокой локальностью и отношением радиусов приемной и передающей катушек не менее 0,2-0,4 от каждого нового слоя, будет составлять от 10 до 25 %, чего вполне достаточно для фиксирования любым измерительным прибором с величиной абсолютной допускаемой погрешности не более 3-5 %.

Примерно такое же значение вклада в величину вносимого напряжения СМВТП дает и увеличение толщины или количества диэлектрических слоев в МПСК. Однако, для принятия решения о годности или негодности контролируемого образца МПСК только по значению этого параметра требуется отстройка дефектоскопа от величины зазора между поверхностью материала и СМВТП,

так как в классической модели его вклад в измеряемый параметр датчика сопоставим с величинами, приведенными выше. С этой целью были получены зависимости показаний прибора ИЭНМ-5ФА от расстояния между поверхностью МПСК и СМВТП.

Чтобы обеспечить отстройку показаний прибора от зазора между датчиком и поверхностью образца в широких пределах и повысить чувствительность, был использован известный в дефектоскопии прием, когда контролируемый материал размещают на поверхности более массивного известного и бездефектного материала.

На рисунке 1 приведена зависимость показаний прибора ИЭНМ-5ФА от расстояния датчика до поверхности МПСК АI-ПЭНД-AI, расположенного на медной основе толщиной 5мм.

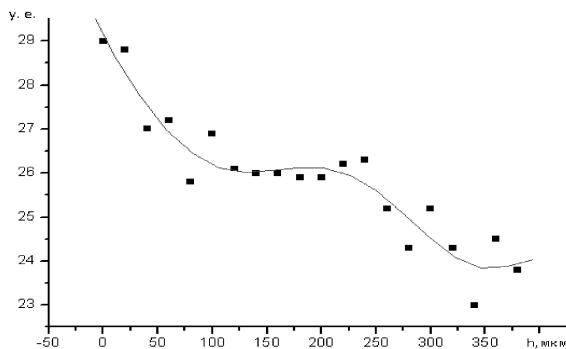


Рисунок 1 - Зависимость условной электропроводности модельного трехслойного МПСК АI-ПЭНД-AI от удаленности датчика

МПСК, использованный в данном эксперименте, был получен чередованием 2-х слоев алюминиевой фольги (20 мкм) и одним слоем полиэтилена низкого давления (20 мкм). Измерения проводились на частоте возбуждения 35кГц, материал основы – ГСО меди М1.

Как следует из рисунка 1, образец такого МПСК по отношению к медной основе выполняет функцию экрана, введенного в зазор между датчиком прибора и медной основой и постепенно ослабляющего измеренный сигнал.

На расстоянии 100-250мкм от поверхности МПСК наблюдается участок, на котором показания прибора сохраняют почти постоянные значения. Очевидно, что на таком удалении от проводящей медной основы топология поля вихревых токов контролируемого образца воспринимается датчиком прибора как поле от однородной среды и появление любого дефекта в материале вызовет отклонение его показаний от среднего значения, измеренного на расстоянии 100-250мкм.

РАЗДЕЛ 3. КОМПОНЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Проведение дефектоскопии МПСК в таком случае возможно при настройке показаний прибора на ноль на бездефектной области (с постоянным значением условной электропроводности) и использовании полого наконечника, выдерживающего постоянное расстояние между поверхностью материала и СМВТП в интервале 100-250мкм.

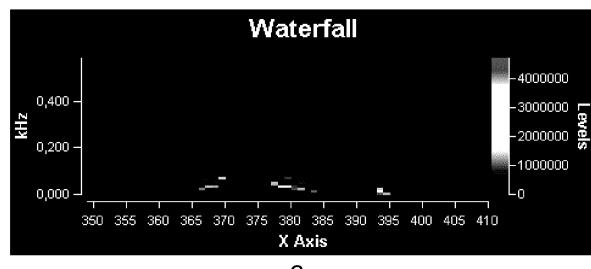
Измерения, проведенные на модельных дефектах типа нарушения количества и порядка слоев для многослойных МПСК систем Al(Cu)-ПЭНД-Al(Cu), показали изменение величины условной электропроводности до 5-8 условных единиц в зоне дефекта, при абсолютной допускаемой погрешности прибора 0,1-0,2 условных единицы, то есть обеспечивали 40...50-кратное превышение сигнала дефекта над шумом. Появление любого из указанных дефектов в зоне контроля вызывает резкое изменение топологии поля и относительных показаний прибора.

Образом дефекта может быть и амплитудно-временная зависимость показаний, уже реализованная в приборе ИЭНМ-5ФА (вкладка «Scope»), при ручном или автоматическом сканировании поверхности объекта.

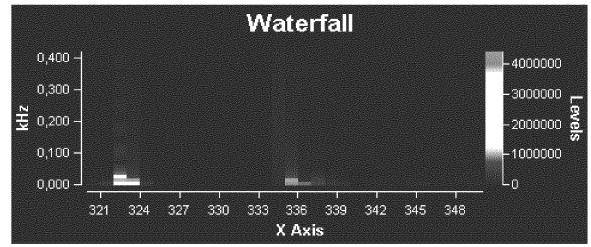
Диагностирование дефектов сплошности МПСК в виде межслойного замыкания, перемычек и др. возможно при непосредственном, контактном сканировании поверхности образца датчиком. В этом случае образом дефекта может служить амплитудно-частотная зависимость сигнала датчика в режиме реального времени, отображаемая вкладкой Фурье-анализатора прибора ИЭНМ-5ФА («Waterfall») [4]. На экране прибора слева отображается основная частота сигнала и его гармоник, об интенсивности которых можно судить по цветовой палитре. Для этого справа отображается шкала, устанавливающая соответствие между цветом и уровнем сигнала (в условных единицах), а по оси X откладывается время, пропорциональное смещению датчика по поверхности МПСК. Масштаб отображения указанных величин на вкладке «Waterfall» зависит от настроек прибора.

На рисунке 2 приведены типичные образы некоторых модельных дефектов МПСК типа слоистой несплошности, полученные Фурье-анализатором прибора при размещении образца МПСК на диэлектрической основе. Как видно из рисунка 2б, полученный на экране Фурье-анализатора ИЭНМ-5ФА образ дефекта типа слоистой несплошности, скрытого в двухслойном МПСК, при выбранном режиме контроля в целом аналогичен образу, полученному от видимого дефекта (рисунок

2а). При разложении сигнала от такого дефекта в спектр прибор отображает несколько его гармоник с различной интенсивностью. Это позволяет осуществлять первичную настройку прибора и обучение оператора диагностике дефектов, скрытых между слоями МПСК, непосредственно по их визуальным моделям.



а.



б.

Рисунок 2 - Образ несплошности в изолированном Al слое (а) и в 2-слойном композите Al-ПЭНД, сканируемом со стороны диэлектрика (б)

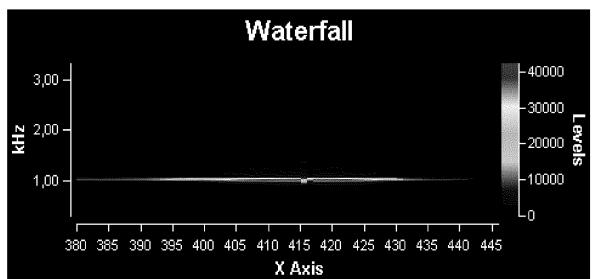
При увеличении количества слоев композита над дефектом появляющиеся в его Фурье-спектре гармоники, накладываясь на основной возбуждающий сигнал СМВТП, изменяют и образ дефекта на экране (рисунки 3, 4).

Как следует из рисунка 3а, в образе дефекта наблюдается явный его пропуск при непрерывном сканировании МПСК. Однако, в области локализации дефекта на основной частоте возбуждения появляется область высокой интенсивности, имеющая другую, более «горячую» окраску и симметрично ограниченную слева и справа менее интенсивными сигналами.

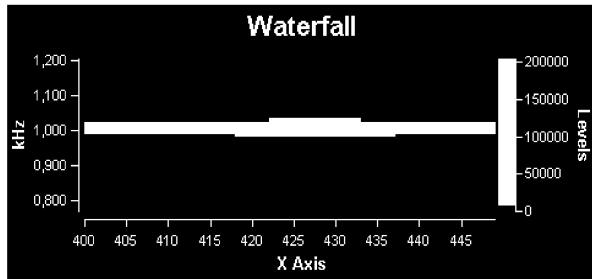
При усложнении строения материала и удалении от дефекта эта область постепенно расширяется (3б), что позволяет более точно выявить его локализацию как в нижнем, недоступном слое, так и во внутренних слоях (рисунок 4).

Связь цвета конкретной гармоники сигнала СМВТП с уровнем ее интенсивности позволяет легко восстанавливать топологию поля вихревых токов вблизи дефекта и по слоям МПСК.

МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ



a.



b.

Рисунок 3 - Образ несплошности в нижнем слое трехслойного композита Al-ПЭНД-Al (а) и пятислойного композита (Al-ПЭНД)-2-Al (б), сканируемых со стороны металла

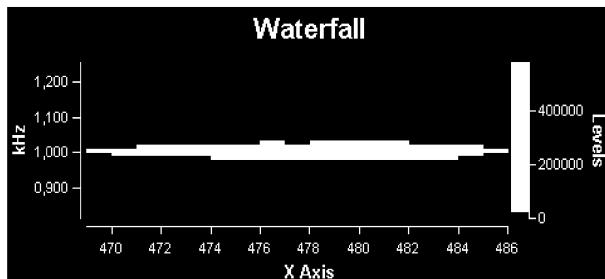


Рисунок 4 - Образ несплошности в металлическом слое, расположенном между 3 и 5 слоями 10-и слойного Al-(ПЭНД-Al)-4-Al композита

На рисунке 5 приведена трехмерная диаграмма, восстановленная по результатам абсолютных измерений электропроводности материала Al-(ПЭНД-Al)₄-Al с дефектом типа несплошности, расположенным в нижнем алюминиевом слое, из которой видно, что при усложнении строения композитного материала и удалении СМВТП от дефекта область поля дефекта постепенно расширяется, что позволяет не только обнаруживать дефекты с малой шириной раскрытия, но и более точно выявить их локализацию как в нижнем, недоступном слое, так и во внутренних алюминиевых слоях.

Выводы

1. Показания прибора ИЭНМ-5ФА при измерении электропроводности МПСК типа Al-(ПЭНД-Me)_n-Al с использованием СМВТП с локальностью до 50 мкм^2 , на зависят от зазора в интервале от 100 до 250 мкм.

В.В. ПОЛЯКОВ, С.Ф. ДМИТРИЕВ, А.В. ИШКОВ, Г.Е. РУДЕНСКИЙ, Е.А., КОЛУБАЕВ, 137
В.Н. МАЛИКОВ

2. Высокая локальность датчика и обнаруженная зависимость электропроводности МПСК от модельных дефектов позволяет осуществлять дефектоскопию многослойных композитов непосредственно по показаниям прибора ИЭНМ-5ФА.

3. Вид дефекта МПСК, его локализацию в слоях, а также топологию поля вблизи дефекта можно идентифицировать по формируемому на экране монитора образу, построенному с применением Фурье - преобразования сигнала, наблюдаемого на выходе СМВТП в процессе перемещения датчика по поверхности МПСК.

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

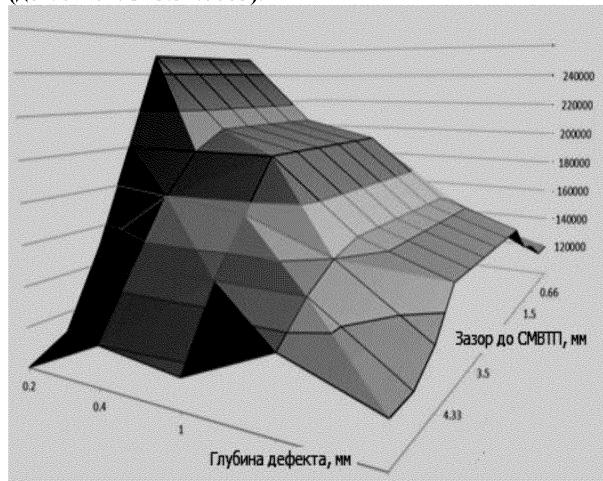


Рисунок 5 - Восстановленная топология поля вблизи несплошности в n-слойном металлополимерном композите

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Герасимов В.Г., Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий [Текст] / Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. - М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1983.
- Ращепкин А.К., Сравнительный анализ композиционных материалов для изготовления труб нефтяной и химической промышленности [Эл. ресурс.] / Ращепкин А.К. // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал. Выпуск 2/2004, режим доступа: <http://www.ogbus.ru/authors/Raschepkin/>
- Неразрушающие испытания [Текст]: справочник. В 2-х книгах /Под ред. Р. Мак-Мастера. - Л.: Энергия, 1965.
- Дмитриев С.Ф., Виртуализированные измерительные приборы, реализующие метод вихревых токов [Текст] / Дмитриев С.Ф., Ишков А.В., Лященко Д.Н., Новоженов А.В. // Научные исследования: информация, анализ, прогноз: монография. -Кн. 28. -Воронеж: ВГПУ, 2010. С. 580-592.
- Сагалаков А.М., Об одной модели отклика вихревокового преобразователя [Текст] / Сагалаков А.М., 137

РАЗДЕЛ 3. КОМПОНЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

галаков А.М., Дмитриев С.Ф., Тарусин Д.Ю., Ишков А.В. // Вестник ТГУ. - Бюлл. опер. научн. инф. № 64, март, 2006. С. 25-29.

Д.т.н., профессор **Поляков В.В.**, к.т.н., доцент **Дмитриев С.Ф.** и магистрант **Мали-**

ков В.Н., - АлтГУ (г. Барнаул); д.т.н., профессор **Ишков А.В.** - АГАУ (г. Барнаул); к.ф.-м.н., гл. спец. **Руденский Г.Е.** и к.ф.-м.н., н. сотр., **Колубаев Е.А.** - ИФПМ СО РАН, ТПУ (г. Томск);-, АлтГУ (г. Барнаул).

УДК: 620.179.14

СВЕРХМИНИАТЮРНЫЕ ВИХРЕТОКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С СЕРДЕЧНИКАМИ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В.В. Поляков, С.Ф. Дмитриев, А.В. Ишков, Г.Е., Руденский, Е.А., Колубаев, В.Н. Маликов

Представлены результаты численных расчетов и инженерной оптимизации двух конструкций оригинального сверхминиатюрного вихревокового преобразователя (СМВТП), предназначенного для комплектования современных приборов и программно-аппаратных комплексов неразрушающего контроля материалов методом вихревых токов с локальностью до 50 мкм².

Ключевые слова: вихревоковый преобразователь, электромагнитное поле, вихревой ток, неразрушающий контроль.

Введение

Во многих прикладных задачах неразрушающего контроля (**НК**) особое место отводится методу вихревых токов (**МВТ**). МВТ базируется на возбуждении в контролируемом объекте или среде вихревых токов под воздействием переменного магнитного поля, создаваемого вихревоковым преобразователем (**ВТП**), и одновременной регистрации ВТП создаваемого вихревым током вторично-го поля [1]. Различные конструкции ВТП позволяют одновременно определять: структурные и физико-химические свойства металлов и сплавов, твердость и электропроводность, толщину образца и его магнитную проницаемость, электропроводность и напряженность магнитного поля на поверхности и пр. Однако, для каждой конкретной измерительной задачи на практике требуется своя конструкция ВТП.

Создание современных измерительных приборов на основе МВТ требует разработки универсальной конструкции ВТП, позволяющей не только одновременно измерять 2,3 и более параметров объекта контроля, но и обеспечивать миниатюризацию самого устройства, локализацию зоны контроля и отстройку от зазора, а также учитывать при измерении чистоту подготовки поверхности и корреляцию одного параметра с другим. Известные конструкции миниатюрных ВТП (с короткозамкнутым витком, с медной вставкой и др.), хотя и обеспечивают локальность до 0,5-2 мм², не позволяют эффективно отстра-

иваться от зазора и чувствительны к шероховатости поверхности объекта контроля [2]. Кроме того в МВТ, уже сейчас необходимы приборы с локальностью до 50 мкм² и ниже.

Для выполнения этих требований ранее нами были разработаны сверхминиатюрные вихревоковые преобразователи (**СМВТП**) с сердечниками переменного сечения, обеспечивающие такую локальность [3]. Величина сигнала в таких СМВТП сложным образом зависит от параметров контролируемого объекта, но если должным образом выстроить математическую модель отклика ВТП на поле вихревых токов, то становится возможным определять раздельно более десятка параметров исследуемого объекта.

Целью настоящей работы явилась оптимизация конструкции СМВТП на основе модели его отклика при нависании над электропроводящей неферромагнитной средой.

Постановка задачи

Задача расчета отклика СМВТП является не только математической, сводящейся к отысканию решения соответствующего уравнения для векторного потенциала в случае определенного значения обобщенного параметра - β_0 , учитывающего свойства объекта, но и физической и инженерной - связанной с подбором оптимальных условий измерений и выбором конструкции самого датчика.

Так, например, расчет напряжения в измерительной обмотке СМВТП, возбуждаемого вихревыми токами, возникающими в неферромагнитном проводящем полупространстве

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2, 2013