



## ВИХРЕТОКОВЫЕ МУЛЬТИДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

В. Н. УЧАНИН

*Представлены новые вихретоковые преобразователи мультидифференциального типа, которые обеспечивают высокую чувствительность, разрешающую способность и селективность при выявлении поверхностных и подповерхностных дефектов разного типа. Представлены результаты исследования сигналов мультидифференциальных преобразователей и сформулированы их основные преимущества. Представлены примеры применения мультидифференциальных преобразователей для решения новых задач неразрушающего контроля.*

*New multidifferential type eddy current transducers are presented. Eddy current transducers provide high sensitivity, spatial resolution and selectivity in surface and subsurface different type flaw detection. The results of multidifferential eddy current transducers responses investigations are presented and main advantages are formulated. The examples of multidifferential eddy current probes application for solving of new tasks in nondestructive testing are presented.*

**Введение.** В вихретоковой дефектоскопии широко используют дифференциальное включение измерительных обмоток вихретоковых преобразователей (ВТП). Это позволяет эффективно подавлять влияние мешающих факторов, в частности, изменений зазора между ВТП и контролируемой поверхностью, а также уменьшить влияние плавных изменения удельной электрической проводимости и толщины контролируемого изделия [1–3]. Ниже представлены ВТП, которые можно отнести к ВТП мультидифференциального типа. Такие ВТП используют дифференцирование второго порядка за счет получения выходного сигнала путем вычитания сигналов двух пар дифференциально включенных измерительных обмоток ВТП. В практике вихретоковой дефектоскопии такие ВТП используются относительно редко, что связано со сложной технологией их изготовления, в частности, с высокими требованиями к идентичности дифференциально включенных измерительных обмоток [4, 5]. В то же время наш многолетний опыт показывает, что на основе применения мультидифференциальных ВТП можно еще больше снизить влияние мешающих факторов и, соответственно, уменьшить отношение сигнал/шум. Особенно эффективно применение мультидифференциальных ВТП в низкочастотном диапазоне рабочих частот для выявления скрытых подповерхностных дефектов, что особенно актуально для авиации, энергетики и других отраслей. При этом получить хорошую чувствительность ВТП на низких рабочих частотах достаточно сложно, так как чувствительность индуктивных элементов ВТП зависит от рабочей частоты. В большинстве случаев для достижения хорошей глубины контроля увеличивают диаметры обмоток и общие размеры ВТП. Однако, при этом снижается разрешающая способность ВТП, что значительно ограничивает возможность

выявления локальных дефектов типа пор и коротких трещин. В представленных ниже мультидифференциальных ВТП хорошая глубина контроля достигается за счет увеличения расстояния между обмотками возбуждения и измерительными обмотками, которые для обеспечения высокой разрешающей способности выполнены относительно малого диаметра.

**Параметры мультидифференциальных ВТП типа Леотест МДФ.** Для решения ряда новых задач неразрушающего контроля в Центре «Леотест-Медиум» разработан комплект новых мультидифференциальных ВТП типа Леотест МДФ для контроля на разных рабочих частотах. ВТП отличаются размерами рабочей площадки, что обусловлено размерами используемых ферритовых сердечников. Использование ферритовых сердечников различного размера, в свою очередь, определяет различную глубину контроля и разрешающую способность. Обеспечение высокой чувствительности обмоток ВТП в диапазоне рабочих частот определяется выбором оптимального числа витков обмоток. Материал ферритового сердечника каждого ВТП выбран с высокой магнитной проницаемостью на конкретных рабочих частотах. Для обеспечения высокой чувствительности высокочастотных ВТП выбран материал ферритового сердечника с низкой электропроводностью. Разработанные ВТП с помощью стандартных разъемов типа Фишер или Лемо адаптированы для работы с дефектоскопами типа ELOTEST фирмы Rohmann и EddyMax фирмы Kontroltechnik GmbH, приборами Института Ферстера и фирмы Hocking NDT Ltd, MFEC-4 (Фраунгофер институт неразрушающего контроля, Саарбрюкен), прибором ОКО-1 (НПФ «Промпрылад», Киев). В табл. 1 представлены низкочастотные и высокочастотные мультидифференциальные ВТП типа Леотест МДФ.



Таблица 1. Низкочастотные и высокочастотные мультидифференциальные ВТП

Тип ВТП	Диаметр рабочей площадки, мм	Диапазон частот, кГц	Применение
Леотест МДФ 0501	5	500,0...6000,0	Выявление поверхностных трещин, пор, локальной коррозии и пр., в том числе в материалах с низкой электропроводностью (титановые сплавы, углеволоконные композиционные материалы).
Леотест МДФ 0502	5	20,0...150,0	Выявление поверхностных и приповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности.
Леотест МДФ 0701	7	1,0...200,0	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 3 мм в неферромагнитных материалах.
Леотест МДФ 0901	9	0,4...300,0	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 5 мм в неферромагнитных материалах.
Леотест МДФ 1201	12,5	0,1...300,0	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 8 мм в неферромагнитных материалах.
Леотест МДФ 1202	12,5	1,0...1000,0	Выявление поверхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов в ферромагнитных материалах через зазор или слой защитного покрытия толщиной до 7...10 мм.
Леотест МДФ 1501	15	0,05...200,0	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 12 мм в неферромагнитных материалах.
Леотест МДФ 1502	15	1,0...800,0	Выявление поверхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах при автоматическом и ручном контроле с зазором относительно поверхности. Сочетание высокой разрешающей способности с большой шириной зоны контроля. Выявление дефектов в ферромагнитных материалах через зазор или слой защитного покрытия толщиной до 10...12 мм.
Леотест МДФ 1701	17	0,05...200,0	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 15 мм в неферромагнитных материалах.
Леотест МДФ 3301	33	0,05...200,0	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 20 мм в неферромагнитных материалах.

**Исследование сигналов мультидифференциальных ВТП.** Представленные выше ВТП были успешно применены для решения многих сложных (в том числе авиационных) задач неразрушающего контроля. В частности, при их помощи проводится механизированный контроль колес самолетов «БОИНГ» на авиаремонтном заводе гражданской авиации и в аэропорту «Борисполь». Комплекс исследований мультидифференциальных ВТП был проведен в Отто-фон-Герике Магдебургском университете, в Уппсала университете (Швеция), Фраунгофер институте неразрушающего контроля (Саарбрюкен, Германия), фирме Тест Maschinen Technik (ТМТ) (Швармштедт, Германия) [10–12]. Во время этих исследований были определены основные преимущества разработанных ВТП, в частности:

- 1) высокая чувствительность к мелким длинным и коротким трещинам, а также к локальным дефектам типа поры или питтинг;
  - 2) хорошее подавление первичного электромагнитного поля;
  - 3) хорошее подавление влияния зазора;
  - 4) высокая разрешающая способность;
  - 5) широкая зона контроля при высокой разрешающей способности;
  - 6) большая глубина контроля на низких рабочих частотах (при этом обеспечивается хорошее соотношение размеров к глубине контроля);
  - 7) высокая чувствительность при контроле через воздушный зазор или диэлектрический слой.
- На рис. 1 представлена типовая трехмерная презентация сигнала от мультидифференциального ВТП типа Леотест МДФ 1201 от локального

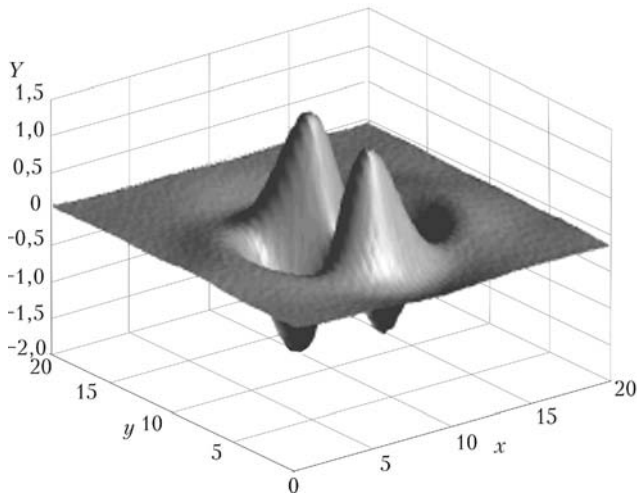


Рис. 1. Распределение сигнала мультидифференциального ВТП от локального дефекта

дефекта, имитированного сверлением диаметром 1мм [1]. Соответствующие двумерные дефектограммы от локального дефекта имеют вид четырехлепесткового изображения, каждый из лепестков которого отвечает зоне чувствительности соответствующей измерительной обмотки ВТП. Необходимо отметить, что благодаря несимметричному (относительно оси ВТП) распределению сигнала он будет сильно зависеть от направления сканирования и ориентации ВТП. В тоже время благодаря двойному дифференцированию сигнал мультидифференциального ВТП от дефекта, длина которого больше размеров ВТП, близок по форме к сигналу, характерному для абсолютного ВТП. Важным свойством мультидифференциальных ВТП является широкая зона контроля, так как такие ВТП по сути являются многоэлементными и захватывают при сканировании достаточно широ-

кую зону контроля. При этом реализуется достижение двух противоречивых и тяжело совместимых требований: высокая разрешающая способность и соответственно высокая чувствительность к локальным дефектам сочетается с большой шириной зоны, которая контролируется при одной траектории сканирования, что позволяет повысить производительность контроля. В практике это позволяет также уменьшить число каналов при построении многоканальных систем вихретокового контроля и, соответственно, их стоимость [11, 12, 15].

Во время исследования мультидифференциальных ВТП проводили сравнение их с известными низкочастотными ВТП типа MDK 33 фирмы Rohmann (Германия) на образцах с дефектами в виде подповерхностных пор разного диаметра и глубины залегания из меди при помощи универсального вихретокового дефектоскопа ELOTEST PL.E и системы двумерной визуализации на основе двухкоординатного сканирующего устройства [10]. Разрешающая способность и локальность контроля оценивалась по диаметру зон чувствительности на двумерной дефектограмме. Ставилась задача не только выявлять дефекты типа поры, но и обеспечить возможность измерять их параметры. Результаты сравнения приведены в табл. 2.

Таким образом, ВТП типа Леотест МДФ 1201 позволяет обеспечить выявление всех локальных дефектов диаметром 0,8 мм и более на глубине 4 мм при соотношении сигнал/шум больше 6 дБ. Стандартный ВТП такой дефект выявляет только на глубине 3 мм, на глубине 4 мм выявляет только дефект 1,5 мм. Кроме того, ВТП типа Леотест МДФ 1201 имеет значительно меньшие размеры, что особенно важно при контроле авиационных конструкций, и лучшую разрешающую способность.

На рис. 2 приведены примеры сигналов, полученных с помощью ВТП типа Леотест МДФ 1201 и дефектоскопа ELOTEST B1 (фирма Rohmann) на рабочей частоте 2 кГц [10]. Другие настройки прибора приведены на рис. 2. Трециноподобные подповерхностные дефекты смоделированы с помощью стандартного образца из алюминиевого сплава фирмы ATG (Прага, Чехия), с разных сторон которого были заложены дефекты с глубиной залегания  $H_3 = 3$  и

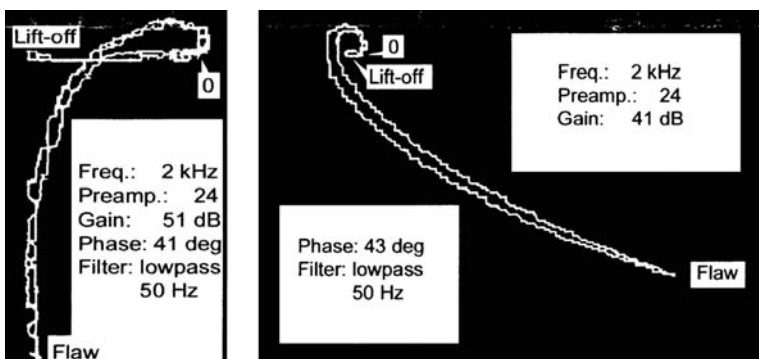


Рис. 2. Сигналы от подповерхностных дефектов в алюминиевой пластине с глубиной залегания 3 и 1 мм, а также от изменений зазора

Таблица 2. Сравнительные данные двух типов ВТП

Тип ВТП	Форма и размер рабочей площадки, мм	Чувствительность		Разрешающая способность (локальность), мм
		остаточная глубина при выявлении поры $\varnothing 0,8$ мм	поры, выявляемые на глубине 4 мм, мм	
Леотест МДФ 1201	Окружность $\varnothing 12$	Под пластиной толщиной 4 мм	$\varnothing 0,8$	$\approx 3$
MDK 33	Квадрат 25×25	Под пластиной толщиной 3 мм	$\varnothing 1,5$	$\approx 5,5$

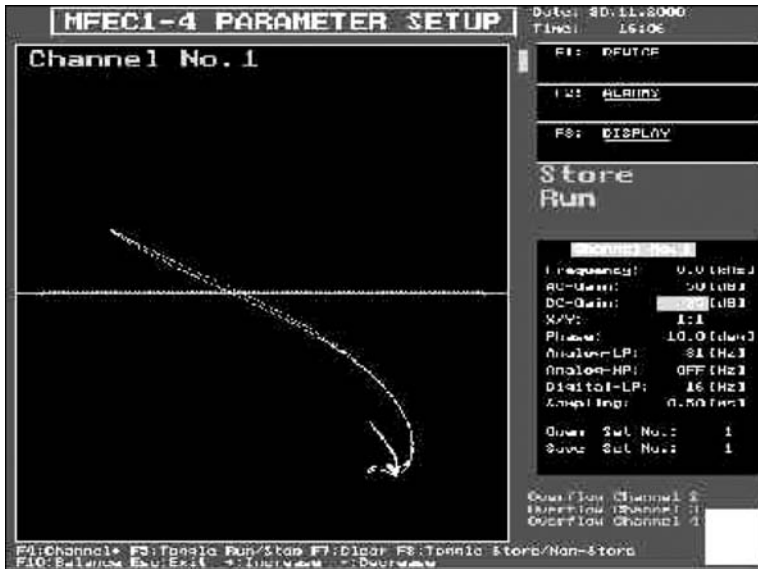


Рис. 3. Сигналы от подповерхностных дефектов в пластине из аустенитной стали с глубиной залегания 2 и 4 мм, а также от изменения зазора

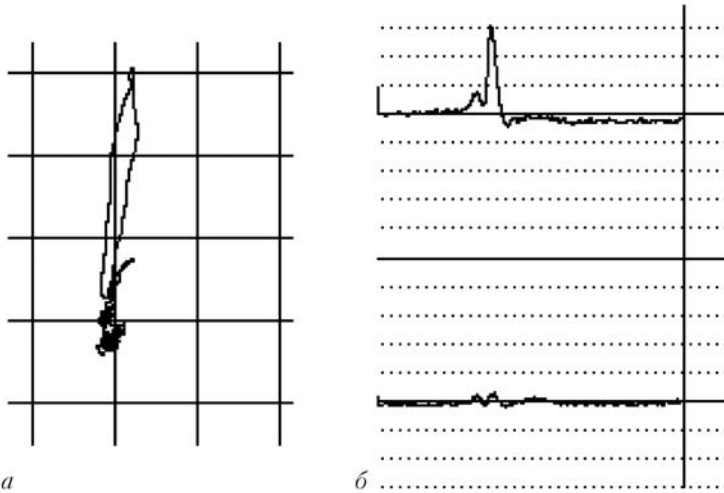


Рис. 4. Сигналы ВТП от дефекта типа трещина при контроле через слой покрытия толщиной 7 мм

1 мм. Для выявления дефектов с разной глубиной залегания было применено различное усиление. На этих рисунках сигнал от подповерхностных дефектов сравнивался с сигналом от полного (подъем ВТП на высоту более 100 мм) сигнала от зазора между ВТП и контролируемой поверхностью. На приведенных дефектограммах четко виден сигнал от подповерхностных дефектов и незначительный сигнал от изменения зазора (для  $H_3 = 1$  мм и соответствующего усиления этот сигнал почти незаметен). Поворотом комплексной плоскости сигнал от изменений зазора был ориентирован в горизонтальном направлении в соответствии со стандартной методикой. При этом соотношение сигнала от дефекта к сигналу от изменений зазора (lift-off на рис. 2) даже для  $H_3 = 3$  мм больше 6 дБ. Кроме того, они отличаются по фазе (направлению годографа сигнала в комплексной плоскости),

что дает дополнительные возможности для их разделения.

Подобные результаты были получены с помощью ВТП типа Леотест МДФ 1201 при подключении к управляемому компьютером дефектоскопу типа MFEC1-4 (Фраунгофер институт НК, Саарбрюкен) [10]. На рис. 3 показан экран компьютера с комплексной плоскостью сигналов ВТП. Сигналы получены с помощью образца из аустенитной стали толщиной 6 мм на рабочей частоте 8,8 кГц. На дефектограмме сверху до низу против часовой стрелки приведены сигналы от двух поверхностных тонких прорезей (первая — 4 мм глубиной и соответственно с глубиной залегания дефекта 2 мм и вторая — прорезь глубиной 2 мм и глубиной залегания 4 мм) и сигнала от полного изменения зазора (отрегулировано поворотом комплексной плоскости в горизонтальном направлении).

В практике неразрушающего контроля существуют задачи, где применению вихретоковых методов нет альтернативы. В частности, большой проблемой является задача обнаружения дефектов, скрытых под слоем защитного диэлектрического покрытия. В этом случае ультразвуковой метод непригоден из-за затухания сигналов в материале защитного покрытия. Капиллярный и рентгеновский методы тоже не применяются из-за ограниченного доступа к контролируемой поверхности. Нами показано, что вихретоковый метод может иметь высокую чувствительность к дефектам при контроле через слой диэлектрического покрытия толщиной до 10 мм [11].

На рис. 4 приведены сигналы, полученные с помощью ВТП типа Леотест МДФ 1202, при контроле образца из ферромагнитного материала (сталь 45) с поверхностной трещиной глубиной 0,5 мм через диэлектрическую пластину толщиной 7 мм. Параметры усиления — предварительный усилитель 32 дБ, усиление по X и Y каналам — 56 дБ. Дефектограммы получены на рабочей частоте 100 кГц с помощью компьютерной системы вихретокового контроля на основе платы EddyMax (фирма ТМТ, Германия). На рис. 4, а приведены сигналы в комплексной плоскости, а на рис. 4, б — компонента Y (вверху) и компонента X сигнала во временной развертке.

Приведенные результаты показали, что вихретоковый метод имеет достаточно высокую чувствительность к дефектам типа трещина при контроле через слой покрытия толщиной 7 мм. В этом



примере применялся малогабаритный мультидифференциальный ВТП, который обеспечивает обнаружение не только трещин, но и локальных дефектов типа язвенная коррозия или поры. При применении мультидифференциальных ВТП большего диаметра (например, типа Леотест МДФ 1501 или МДФ 1701) существует возможность контроля через более толстые слои или зазоры. Но разрешающая способность и локальность контроля при этом снижаются.

**Применение мультидифференциальных ВТП.** Рассмотрим примеры применения мультидифференциальных ВТП в практике неразрушающего контроля.

Описанные выше исследования показали перспективу использования мультидифференциальных ВТП для выявления дефектов под обшивкой в многослойных конструкциях и дефектов под слоем герметика. Это дало возможность с успехом применять их для обнаружения дефектов в неразъемных узлах авиационных конструкций без их демонтажа. Соответствующие методики были разработаны ранее на основе применения дефектоскопов типа ПОЛЕТ [6–8]. Но этот опыт актуален и сейчас, тем более, что для реализации соответствующих методик можно применять современные универсальные дефектоскопы [16].

Оригинальная методика была предложена для обнаружения дефектов под ремонтной накладкой на средней части крыла самолета ТУ-154. Особенность состоит в том, что возможные дефекты надо было обнаруживать на дне закругленной выборки глубиной 1 мм, которая образовалась после удаления поверхностного дефекта с целью уменьшения концентрации напряжений. Для усиления ослабленного узла на соответствующую зону наклеивали по специальной технологии ремонтную накладку толщиной 2 мм. Эксплуатация ослабленной конструкции допускалась только при условии периодического контроля с целью обнаружения возможных дефектов на дне выборки через каждые 300 посадок самолета. Сложность задачи состояла не только в необходимости обнаружения дефектов на глубине 2 мм, но и в необходимости селективно выявлять трещины на дне выборки, которая сама по себе также является дефектом. Проведенные исследования показали возможность раздельного выявления дефектов на дне выборки с отстройкой от влияния самой выборки. В этом случае возможны два варианта методик: разделение сигналов по амплитудному признаку (для чего необходимо знать амплитуду сигнала от выборки известных размеров) и амплитудно-фазовый способ, базирующийся на различии глубин залегания выборки и трещины, которая может образоваться на дне выборки. При использовании амплитудно-фазового метода удается полностью заглушить влияние выборки. Для настройки дефектоскопа

необходимо подготовить два контрольных образца, которые имитируют ситуацию (рис. 5). Один образец имитирует бездефектную (только с выборкой) обшивку 3 с накладкой 1 (рис. 5, а), второй — обшивку со сквозным дефектом типа трещина 4 на дне выборки (рис. 5, б).

Длительное время вихретоковый метод считали неперспективным для дефектоскопии ферромагнитных материалов, что можно объяснить влиянием неоднородности магнитной проницаемости большинства конструкционных сталей. Однако в настоящее время вихретоковый метод все шире применяется для контроля ферромагнитных материалов. Показано, что влияние неоднородности материала можно заглушить даже для сильно неоднородных ферромагнитных материалов, в частности, в зоне сварных соединений. Это можно обеспечить, например, на основе применения нескольких рабочих частот или подмагничиванием зоны контроля постоянным магнитным полем. Хорошие результаты дает также применение мультидифференциальных ВТП [7]. В частности, решена задача контроля штоков амортизаторов шасси самолета ТУ-154, изготовленных из стали ЭИ643 и покрытых слоем хрома. Внешний вид штоков и характер расположения типовых дефектов показаны на рис. 6.

Обычно контроль штоков при эксплуатации авиационной техники проводится магнитопорошковым методом с помощью дефектоскопа ПМД-70. Недостаток этого метода — высокая трудо-

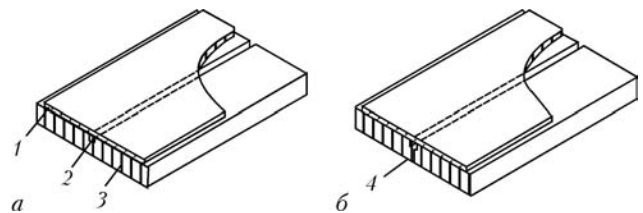


Рис. 5. Контрольные образцы для настройки дефектоскопов при выявлении дефектов на дне выборки под ремонтной накладкой: а — образец без дефекта для отстройки от влияния выборки; б — образец с дефектом для проверки чувствительности дефектоскопа

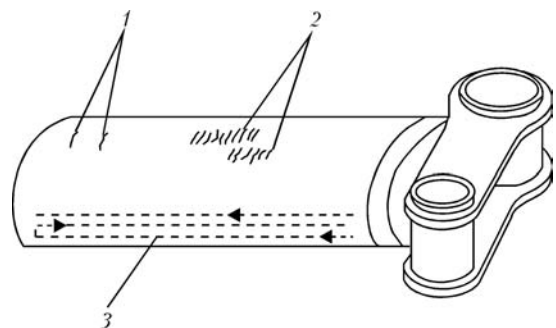


Рис. 6. Шток амортизаторов и характер расположения дефектов: 1 — одиночные трещины; 2 — скопление трещин; 3 — траектория сканирования

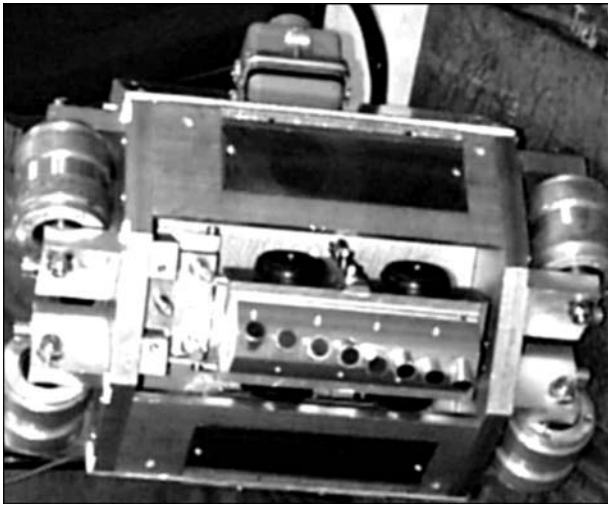


Рис. 7. Внешний вид восьмиканального сканера для контроля угловых сварных швов

емкость, обусловленная необходимостью намагничивания и размагничивания штоков, а также применения магнитных суспензий. Более того, для проведения контроля необходимо участие не менее двух операторов. При применении вихревого метода выявляются прижоговые трещины длиной более 2 мм и глубиной более 0,4 мм под слоем хрома толщиной 100 мкм, которые образовались в процессе эксплуатации штоков из-за высоких контактных нагрузок и местного нагрева материала. Контроль проводится на частоте 3 кГц амплитудным или амплитудно-фазовым методом. Амплитудно-фазовый метод применяется для отстройки от помех, обусловленных неоднородностью магнитных свойств материала. Производственные испытания подтвердили более высокую эффективность вихревого контроля, трудоемкость которого в 8...10 раз меньше трудоемкости контроля магнитным методом [7].

Предложенные Центром «Леотест-Медиум» технологии и ВТП применены фирмой Test Maschinen Technik GmbH (Германия) для создания двух вариантов многоканальных механизированных установок на базе дефектоскопа EddyMax для выявления дефектов в зоне сварных швов через слой защитного покрытия (один вариант для контроля угловых сварных швов, второй — для свар-

ных швов, выполненных внахлест). В каждой установке используются по восемь ВТП типа Леотест МДФ 1202, сигналы от которых обрабатываются при помощи независимых измерительных каналов. На рис. 7 показан внешний вид блока ВТП и сканера для контроля угловых сварных швов. На рисунке видно восемь ВТП типа Леотест 1202, развернутых под разным углом (крайние ВТП развернуты на 90°) для контроля всего сечения шва и околошовной зоны.

Еще один интересный пример применения низкочастотного мультидифференциального ВТП касается задачи выявления дефектов на внешней и внутренней сторонах труб, изготовленных из нержавеющей стали 40X25H20. Диаметр труб — 102,0 мм, толщина стенки — 15,0 мм. Специфика задачи состоит в большой структурной неоднородности материала труб, из-за чего возникает большое затухание и рассеивание ультразвуковых колебаний. Поэтому применение ультразвукового метода для обнаружения дефектов неэффективно. Проведенные исследования показали возможность решения задачи вихрековым методом на базе применения ВТП типа Леотест МДФ 3301 (см. табл. 1), который обеспечивал выявление внутренних дефектов глубиной, равной 30 % толщины на обратной стороне пластин из нержавеющей стали толщиной 15 мм. При этом за счет интегрирующих свойств самого ВТП (который фактически реализует пространственную фильтрацию [15]) обеспечивается меньший уровень структурных шумов на образцах реальных труб из стали марки 40X25H20 в сравнении с другими ВТП. Исследования проводили на образцах фрагментов трубы с искусственными дефектами, выполненными тонкой фрезой толщиной 0,8 мм. На рис. 8 показаны сигналы ВТП в комплексной плоскости при сканировании внешнего продольного дефекта глубиной 21 % и внутреннего поперечного дефекта глубиной 53 % на разных рабочих частотах.

Представленный ВТП типа Леотест МДФ 3301 применяли для решения поставленной задачи в составе, разработанной НПФ «Промприлад» (г. Киев), специализированной автоматизированной системы вихревого

контроля типа КРАБ [15]. Система КРАБ обеспечивает четырехканальный двухчастотный автоматизированный контроль труб и состоит из сканирующего устройства, промышленного компьютера, четырех идентичных вихрековых плат и платы управления сканером. Каждая плата обрабатывает сигналы от одного ВТП на двух рабочих частотах 1,5 и 5 кГц. Это необ-

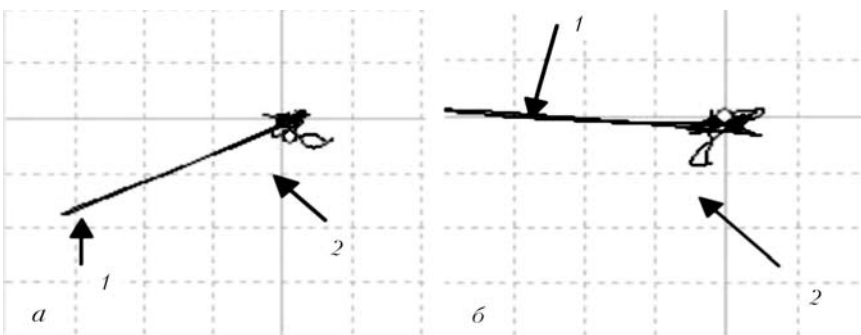


Рис. 8. Сигналы от внешних (1) (21 % толщины) и внутренних (2) дефектов (51 % толщины) на рабочих частотах 1,5 (а) и 3,0 кГц (б)

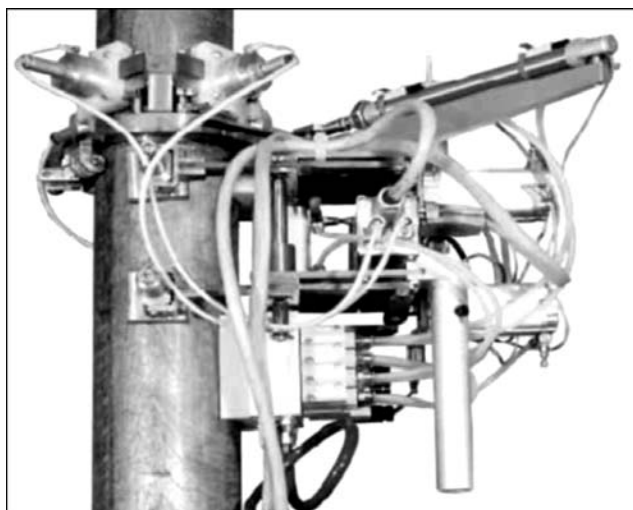


Рис. 9. Сканирующее устройство с ВТП типа Леотест МДФ 3301 системы КРАБ для автоматизированного вихретокового контроля цилиндрических объектов

ходимо для обеспечения возможности идентифицировать дефекты на внешние и внутренние. Система обеспечивает оценку глубины выявленного дефекта в процентах от толщины стенки трубы независимо от его расположения. Внешний вид сканирующего устройства с ВТП типа Леотест МДФ 3301, установленного на трубе, показан на рис. 9.

Сканирующее устройство обеспечивает одновременное перемещение четырех ВТП, каждый из которых контролирует свой сектор трубы по траектории типа меандр. После контроля участка трубы все ВТП перемещаются на следующий участок. Конструкция сканера позволяет фиксировать его на цилиндрической поверхности не с торца, а с боковой поверхности, что дает возможность обеспечить автоматический контроль смонтированных деталей во время ремонтов.

Пример применения высокочастотного ВТП типа Леотест МДФ 0501 в составе компьютеризованного дефектоскопа типа MFEC1-4 предоставлен Фраунгофер институтом неразрушающего контроля (Саарбрюкен). На базе этих преобразователей разрабатывалась технология выявления внутренних и внешних дефектов трубок из специальной низкопроводящей керамики (удельная электропроводность менее 0,1 МСм/м). Внешний диаметр трубок 21 мм при толщине стенки 2,2 мм. Дополнительными источниками возможных помех при контроле этих трубок были также слабая намагниченность материала трубок и их небольшая овальность.

На рис. 10 показаны результаты контроля образца трубок с внутренним искусственным дефектом глубиной 1,5 мм (остаточная толщина 0,7 мм) и внешним дефектом глубиной 0,5 мм. Контроль проводили в динамическом режиме путем вращения ВТП вокруг трубы на рабочей частоте 4 МГц. Искусственные дефекты типа трещины выполнены

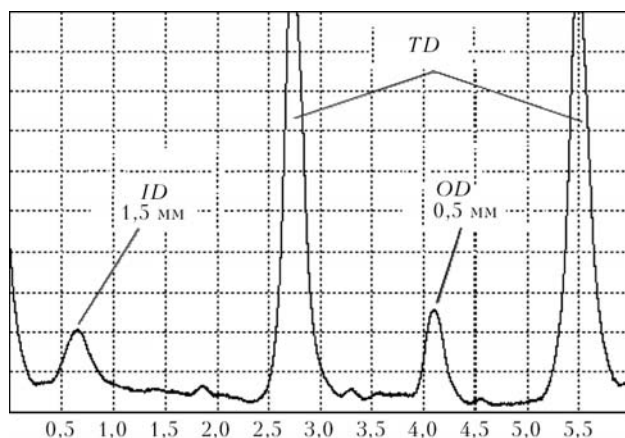


Рис. 10. Сигналы от внутренних ID, внешних OD и технологических дефектов TD в низкопроводящей керамике на рабочей частоте 4 МГц

в виде пропилов длиной более 15 мм и шириной 0,5 мм. При изготовлении образца трубки разрезали на две половины, которые после нанесения дефектов склеивали. Таким образом образовались технологические сквозные дефекты, сигналы от которых также видны на дефектограмме (TD на рис. 10).

### Выводы

Мультидифференциальные вихретоковые преобразователи типа Леотест МДФ позволяют решать принципиально новые задачи неразрушающего контроля за счет высокой чувствительности к дефектам разного типа, хорошего соотношения сигнал/шум в условиях воздействия мешающих факторов, высокой разрешающей способности и большой глубины контроля (для низкочастотных ВТП).

1. Дорощев А. Л., Казаманов Ю. Г. Электромагнитная дефектоскопия. — М.: Машиностроение, 1980. — 232 с.
2. Libby H. L. Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods. —New-York etc: Wiley-Interscience, 1971. — 365 p.
3. Mook G., Bauke H., Uchanin V. Wirbelstromprüfung mit hohen Eindringtiefen — Theorie und Praxis. Abstracts of the DACH (DGZfP, ЦГfZP, SGZP) Jahrestagung Innsbruck, Mai 29–31, 2000 (см также сайт: www.ndt.net. Интернет журнал NDTnet. 2000, august. — 5, № 8).
4. Пат. № 2541772 (Франция). G 01 N 27/90. Procédé et dispositif pour l'examen non destructif de junctions rivetées ou analogues au moyen d'une sonde a courants de Foucault / J.-L. Arnaud, M. Floret (Франция). — № 8303043; заявл. 24.02.1984. — Оpubл. 31.08.84. — 22 с.
5. А.с. 1767409 СССР. МКИ G 01 N 27/90. Вихретоковый преобразователь / В. Н. Учанин, Ю. С. Грабский (СССР). — № 4869272/28; заявл. 19.07.90. — Оpubл. 07.10.92, Бюл. № 37. — 3 с.
6. Учанин В. Н. Вихретоковый метод обнаружения скрытых дефектов усталостного и коррозионного происхождения. — Киев: Об-во «Знания» УССР, 1988. — 20 с.
7. Учанин В. Н., Цирг В. Н. Опыт применения низкочастотных вихретоковых дефектоскопов для выявления скрытых дефектов усталостного и коррозионного происхождения // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1989. — № 4. — С. 71–75.
8. Учанин В. Н., Цирг В. Н. Обнаружение скрытых коррозионных повреждений авиационных конструкций вихре-



- токовым методом // Физ.-хим. механика материалов. — 1990. — № 4. — С. 103–104.
9. *Uchanin V.* New type multidifferential eddy current probes for surface and subsurface flaw detection // *Zeszyty problemowe Badania nieniszczące*. Warszawa. — 2001. — № 6. — С. 201–204 (см. также сайт: [www.usndt.com.ua](http://www.usndt.com.ua)).
  10. *Uchanin V., Mook G., Stepinski T.* The investigation of deep penetrating high resolution EC probes for subsurface flaw detection and sizing, 8-th Europ.Conf. for NDT, Barcelona. 2002 (див. також сайт: [www.ndt.net](http://www.ndt.net). Інтернет журнал NDTnet. — 2003, February, — 8. — № 2).
  11. *Учанин В. Н.* Применение вихретокового метода для обнаружения дефектов в ферромагнитных материалах через слой защитного покрытия // Мат. Одиннадцатой ежегодной международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — Ялта. — 2003. — С. 180–182.
  12. *Учанин В. М., Яшан А. В., Беккер Р., Диске М.* Возможность підвищення продуктивності вихреструмової дефектоскопії при застосуванні мультидиференційних перетворювачів // Мат. 4-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика» (НКТД-2003). — Київ. — 2003. — С. 121–124.
  13. *Uchanin V.* The investigation of low frequency eddy current probes with super high penetration (THP04). Abstracts of 16-th world conference on non-destructive Testing, Montreal. — 2004, August 30–September 3. — P. 145.
  14. *Учанин В. Н.* Развитие вихретоковых методов обнаружения подповерхностных дефектов // Праці 3-ї Наук.-техн. конф. «Приладобудування 2004: стан і перспективи». — Київ: ПФ НТТУ «КП». — 2004. — С. 190–191.
  15. *Луценко Г. Г., Учанин В. Н., Гозуля В. Н.* Автоматизированная многоканальная вихретоковая система для выявления и идентификации дефектов глубокозалегающих и поверхностных труб из неферромагнитных сталей / Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів (серія). — Вип. 10: Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів: Зб. наук. праць. — Львів: Фіз.-мех. інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2005. — С. 108–111.
  16. *Гозуля В. Н., Учанин В. Н.* Создание универсального вихретокового дефектоскопа ОКО-01 и его применение для контроля элементов авиационных конструкций и продуктопроводов // Тр. Первой всерос. науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и техническая диагностика при производстве и эксплуатации авиационной и космической техники» (выпущено на компактном диске). — Санкт-Петербург, 5–7 октября 2005 г.

Физ.- мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины,  
Центр «Леотест-Медиум»,  
Львов

Поступила в редакцию  
26.12.2005

**Ремонт кузовов, котлов и модернизация железнодорожных вагонов и цистерн.**

**Экспертное техническое диагностирование сосудов работающих под давлением, в том числе котлов, цистерн и других ответственных металлоконструкций.**

**Продление ресурсного срока железнодорожных грузовых вагонов и цистерн, в том числе подведомственных Госнадзорохрантруда.**

**Производство резервуаров и сосудов различного объема, в том числе работающих под давлением.**

**Предприятие имеет все необходимые лицензии и разрешения.**



# ООО "СЕРЕП"











**Наши координаты:**

**Почтовый адрес:** 87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7

**Тел.:** 10-38 (0629) 33-43-85, 33-70-90

**Факс:** 10-38 (0629) 33-65-23, 53-00-85

**E-mail:** [serep@azov.net](mailto:serep@azov.net)

**http://www.serep.azov.net**