



## Lamination Detection in Carbon Fiber Reinforced Plastics with the Use of Tangential Eddy Current Transducers

V. A. Syasko,  
D. N. Chertov

The construction principles of probes for lamination detection in the carbon fiber structures are described in the article. Principles of probes characteristics calculation and optimization are presented as well as methods of stray parameters suppression. Design and main technical characteristics of the probes are given.

# ВЫЯВЛЕНИЕ РАССЛОЕНИЙ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ ВИХРЕТОВОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В авиа-, ракето- и судостроении существенно возросло применение конструктивных углепластиковых материалов (УКМ).

В процессе производства и эксплуатации изделий из УКМ могут образовываться различные виды неоднородностей структуры, в том числе расслоения, обусловленные потерей связи между слоями армирующего материала за счет недостатка связующего или за счет механических напряжений или высокой температуры [1].

Изделия из УКМ могут быть площадью до десятков квадратных метров. В большинстве случаев при контроле затруднен двусторонний доступ к стенке изделия, что, в совокупности со спецификой

структуры материала, серьезно ограничивает число видов НК для выявления указанных дефектов. В связи с этим представляет интерес использование вихретокового вида НК для решения задач выявления расслоений и оценки глубины их залегания.

Для данной задачи объект контроля следует рассматривать как много-

слойную электропроводящую неферромагнитную пластину толщиной  $T$  с электропроводностью  $\sigma_i$  каждого слоя. При этом можно говорить о некотором интегральном значении электропроводности  $\sigma_n$  объекта контроля в объеме распространения вихревых токов. Проведенные в соответствии с [2] исследования показали, что для большин-

Сотрудники ЗАО «Константа»,  
Санкт-Петербург:



Сясько  
Владимир Александрович  
Генеральный директор, к. т. н.



Чертов  
Дмитрий Николаевич  
Инженер-электронщик, аспирант НМСУ  
«Горный».

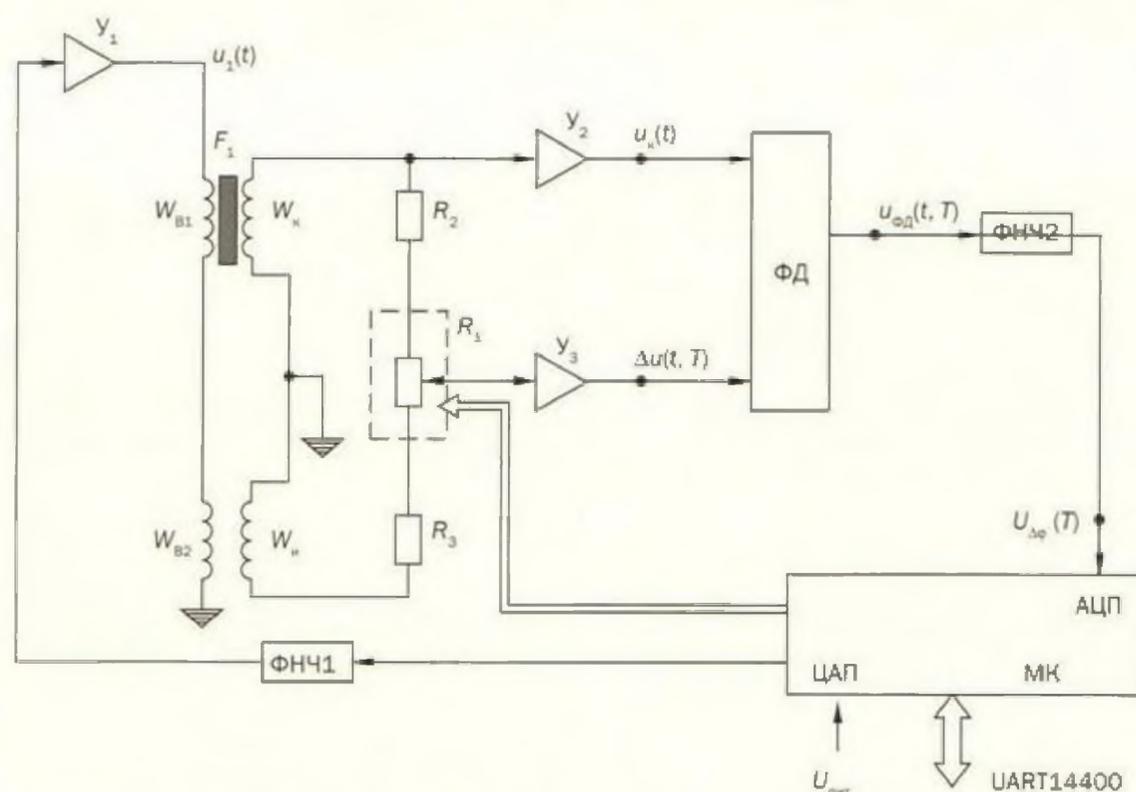


Рис. 1. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя:  $Y_1 - Y_3$  — усилители, ФД — фазовый детектор, ФНЧ1 — ФНЧ2 — фильтры низкой частоты,  $W_{B1}$ ,  $W_{B2}$  — обмотки возбуждения,  $W_K$  и  $W_M$  — дифференциально включенные компенсационная и измерительная обмотки, МК — микроконтроллер,  $R_1$  — управляемый цифровой балансировочный потенциометр,  $F_1$  — ферритовый броневой сердечник

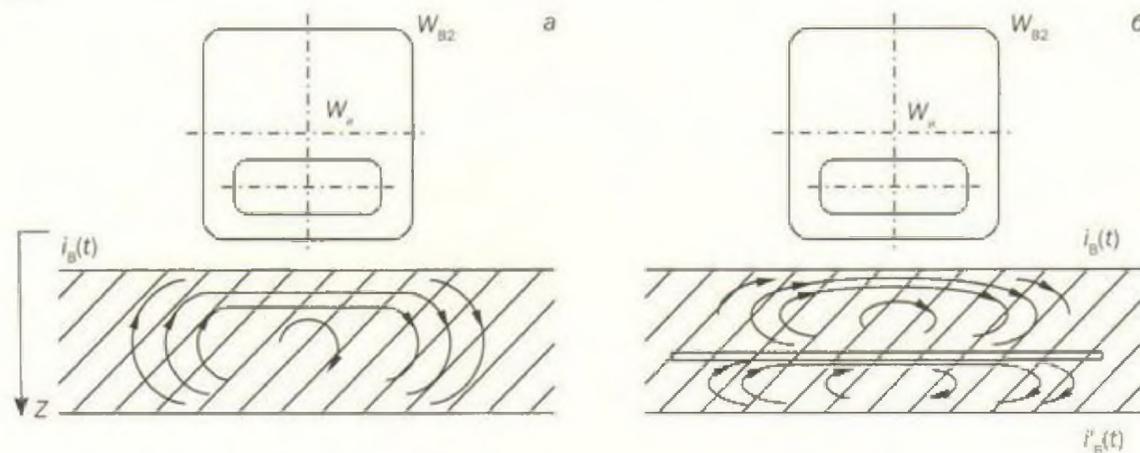


Рис. 2. Чувствительный элемент преобразователя для выявления внутренних расслоений в изделии:  $W_{в2}$  — обмотка возбуждения,  $W_{и}$  — измерительная обмотка. Картина распределения вихревых токов в плоскости обмоток: а — без расслоения, б — при расслоении

ства изделий из УКМ  $\sigma_{и}$  лежит в диапазоне  $= 5 \div 40$  кСм/м и может сильно варьироваться (до  $\pm 10 \div 15\%$ ) в одном изделии.

Вихретоковый фазовый метод измерения параметров изделий из электропроводящих материалов основан на анализе электромагнитного поля вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте, которые зависят от  $T$ ,  $\sigma_{и}$  и геометрических характеристик материала (диаметра  $d$ , шероховатости  $R_z$  и др.), а также величины зазора  $h$  между изделием и контактной поверхностью преобразователя.

Структурная схема трансформаторно-трехобмоточного вихретокового фазового преобразователя, использующего в качестве опорного сигнала напряжение на компенсационной обмотке, изображена на рис. 1.

Обмотка  $W_{в}$  запитывается синусоидальным напряжением  $u_{в}(t)$  частоты  $f$ . Усиленное разностное (вносимое) напряжение  $\Delta u(t, T)$  поступает на фазовый детектор ФД. Опорным сигналом для фазового детектора служит напряжение  $u_{и}(t)$  с выхода компенсационной обмотки  $W_{к}$ . Постоянное напряжение  $U_{до}$  на выходе фильтра низкой частоты пропорционально разности фаз  $\Delta\varphi$  между напряжением  $u_{и}(t)$  и разностным (вносимым) напряжением  $\Delta u(t, T)$ . Балансировка обмоток преобразователя производится с исполь-

зованием цифрового потенциометра, управляемого микроконтроллером.

Используемые для большинства задач контроля и измерений традиционные чувствительные элементы, состоящие из двух соосных круговых обмоток, ось которых перпендикулярна поверхности изделия, в данном случае не подходят, т. к. создаваемый круговой вихревой ток не будет изменять свою картину при наличии внутренних расслоений материала [3]. Представляет интерес использование линейных проводников для формирования вихревых токов в изделии [4]. Линейный участок проводника с высокочастотным гармоническим током  $i(t)$ , параллельный поверхности электропроводящего изделия, а также картина создаваемых им вихревых токов  $i_{и}(t)$  в сечении, проходящем через проводник перпендикулярно к поверхности, представлены на рис. 2а. В случае наличия расслоения картина вихревых токов претерпит изменения, возникнут два контура вихревых токов  $i_{и}(t)$  и  $i'_{и}(t)$ .

Предлагаемая схема обмоток чувствительного элемента тангенциального преобразователя для выявления внутренних расслоений представлена на рис. 2.

Квадратная обмотка возбуждения  $W_{в2}$  одной из сторон устанавливается на изделие и создает вихревой ток  $i_{и}(t)$  (рис. 2а). Измерительная обмотка  $W_{и}$  находится в плоскости обмотки  $W_{в2}$  (об-

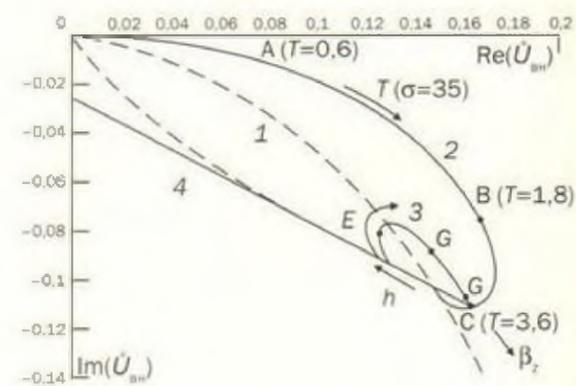


Рис. 3. Зависимость комплексного вносимого напряжения  $\dot{U}_{и*}$  от глубины залегания расслоения  $Z$  для изделия с параметрами  $T = 3,6$  мм,  $\sigma_{и} = 35$  кСм/м ( $E: Z = 0,6$  мм,  $F: Z = 1,8$  мм,  $G: Z = 3$  мм)

мотки  $W_{в1}$  и  $W_{и}$ , располагаемые на удалении от изделия, условно не показаны). Вносимое напряжение  $\dot{U}_{и*}$  на измерительной обмотке  $W_{и}$  будет зависеть, в том числе, от наличия расслоений, размеры которых сопоставимы с размером зоны контроля чувствительного элемента. Размеры зоны контроля можно считать приблизительно  $2L \times 2L$ , где  $L$  — длина стороны обмотки  $W_{в2}$ . Если при сканировании поверхности изделия преобразователь будет пересекать расслоение, сопоставимое по размерам с его зоной контроля, то картина вихревых токов изменится, появятся два контура вихревых токов в каждом из слоев изделия (рис. 2б), что вызовет изменение амплитуды и фазы  $\dot{U}_{и*}$ .

В качестве обобщенного параметра для данного преобразователя примем величину  $\beta_2 = L(2\pi f \sigma_{и} \mu_0)^{1/2}$ .

Для обеспечения приемлемой чувствительности при контроле расслоений величину  $\beta_2$  будем выбирать на уровне  $0,5 \div 2$ . Максимальная толщина контролируемых изделий должна выбираться из условия  $T_{\max} \approx 1,4\delta$  [5], где  $\delta = 1/(\pi f \sigma_{и} \mu_0)^{1/2}$ .

Отсюда следует, что оптимальное значение частоты преобразователей для контроля расслоений равно:  $f_0 = 1,96/(\pi \mu_0 \sigma_{и} T_{\max}^2)$ .

Для изделий с интегральной электропроводностью  $\sigma_{и} = 35$  кСм/м оптимальные частоты для граничных значений  $T$  составят  $f_0|_{T=10\text{мм}} \approx 140$  кГц и  $f_0|_{T=2\text{мм}} \approx 1,4$  МГц. Для изделий с интегральной электропроводностью  $\sigma_{и} = 7$  кСм/м  $f_0|_{T=10\text{мм}} = 704$  кГц и  $f_0|_{T=2\text{мм}} = 17,5$  МГц. Для преобразователей с  $L = 6 \div 15$  мм при рассчитанных значениях частот  $\beta_2 = 1,4 \div 3$ , что, в принципе, удовлетворяет условиям обеспечения оптимальной чувствительности.

На рис. 3 представлена зависимость  $\dot{U}_{и*} = \dot{U}_{и*}^* / |\dot{U}_{и*}^*|$  от толщины изделия с электропроводностью  $\sigma_{и} = 35$  кСм/м

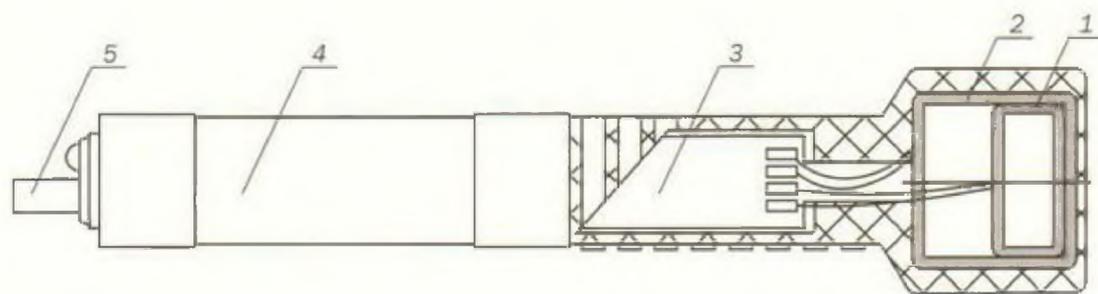


Рис. 4. Конструкция измерительного преобразователя: 1 — измерительная обмотка; 2 — возбуждающая обмотка; 3 — печатная плата; 4 — корпус; 5 — соединительный кабель к блоку обработки и представления информации

для преобразователя с параметрами  $f = 0,9$  МГц и  $L = 15$  мм (кривая 1). Кривая 2 — зависимость  $\dot{U}_{\text{вн}}^*$  от положения расслоения по глубине  $Z$  для изделия с максимальной толщиной 3,6 мм. При толщине слоя углепластикового полотна 0,6 мм во всем диапазоне изменения  $Z$  от 0,6 до 3 мм обеспечивается приемлемая чувствительность, позволяющая уверенно выявлять расслоения при указанной выше девиации  $\sigma_{\text{н}}$ . Линия отвода 4 иллюстрирует влияние  $h$ . Для подавления влияния зазора (а также эквивалентных зазору  $R_2$  и  $d$ ) необходимо электронной балансировкой с использованием управляемого потенциометра  $R_1$  смещать точку комплексного относительного вносимого напряжения на воздухе по мнимой оси на величину  $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ , соответствующую толщине изделия  $T$ .

Для других значений  $\sigma_{\text{н}}$  и  $T$  годографы, рассчитанные в соответствии с определенными выше параметрами, носят аналогичный характер с соответствующим масштабированием. Рассматриваемый преобразователь (рис. 4) не позволяет плавно изменять частоту возбуждаю-

щего тока, поэтому необходимо оптимальным образом подобрать частоты нескольких преобразователей для перекрытия диапазонов измерения  $T$  и  $\sigma_{\text{н}}$ .

Градуировка преобразователей производится на эталонных образцах с искусственными (заложенными) расслоениями, которые изготавливаются по технологии производителя изделий. Семейство характеристик записывается в память микроконтроллеров измерительных преобразователей. Элементы электрической схемы, представленной на рис. 1, располагаются на печатной плате внутри преобразователей, что позволяет существенно уменьшить уровень наводок и собственных шумов и обеспечить требуемую чувствительность при измерениях. Связь с блоком обработки и представления информации «Константа ВД1» осуществляется по каналу связи UART.

Диапазон толщин стенок контролируемых изделий составляет от 2 до 12 мм при электропроводности от 7 до 42 кСм/м. Влияние зазора подавляется в диапазоне до 0,3 мм, а шероховатости до величины  $R_a = 150$  мкм.

Абсолютная погрешность измерения глубины залегания дефекта не превышает половины толщины слоя углепластикового полотна. Прибор «Константа ВД1» с комплектом преобразователей введен на ряде предприятий.

#### Литература

1. Перепелкин К.Е. Полимерные композиты на основе химических волокон, их основные виды, свойства и применение. URL: <http://www.uncm.ru/>
2. Pauw van der L.J. A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape. — Philips Techn. Rev. 1958/59, V. 20, No. 8, P. 220 – 224.
3. Дорофеев А.Л., Никитин А.И., Рубин А.Л. Индукционная толщинометрия. — М.: Энергия, 1978. — 184 с.
4. Moles M., Lamarre A., Dupuis O. Complete inspection of friction stir welds in aluminum using ultrasonic and eddy currents arrays. — In: 16th WCNDT. — Montreal, 2004, paper No. 84.
5. Потапов А.И., Сясько В.А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий./Научное, методическое, справочное пособие. — СПб.: Гуманистика, 2009. — 904 с.

Статья получена 6 июня 2012 г.

# КОНСТАНТА®

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ УГЛЕПЛАСТИКОВ И УУКМ

Бесконтактный контроль с односторонним доступом.  
Измерение электропроводности, толщины материала и покрытия,  
обнаружение поверхностных и внутренних дефектов:  
разрывов волокон и расслоений.



## Вихретоковый дефектоскоп КОНСТАНТА ВД1

198095, Санкт-Петербург, а/я 42, тел./факс (812) 372-29-03, 372-29-04

на правах рекламы