

## Выявление расслоений и глубины их залегания в углепластиковых конструкциях с использованием вихретокового вида НК

**А.И. Потапов, В.А. Сясько, Д.Н. Чертов**

*Рассмотрены принципы построения преобразователей для контроля расслоений в углепластиковых конструкциях. Представлены основы расчета и оптимизации характеристик преобразователей, а также подавления мешающих параметров. Приведены конструкция и основные технические характеристики преобразователей.*

**Ключевые слова:** углеродные композиционные материалы, расслоения, вихретоковый, неразрушающий контроль.

## Detection of the delaminations and their depth in the CFRP structures using eddy current type of NDE

**A.I. Potapov, V.A. Syasko, D.N. Chertov**

*The construction principles of probes to control delamination in the carbon fiber structures is described in the article. Principles of calculation, optimization of the probes characteristics and methods of suppression of stray parameters are described. Design and main technical characteristics of the probes are presented.*

**Keywords:** carbon fiber reinforced plastic, delamination, eddy current, non-destructive testing.

**В** авиакосмической технике существенно возросло применение конструкционных углепластиковых материалов, имеющих ряд уникальных характеристик, которые зависят от схемы армирования, вида и текстуры волокна, степени наполнения, свойств полимерной матрицы (связующего), соблюдения технологического процесса производства и т. д.

В процессе производства в углепластиковых изделиях могут образоваться различные виды неоднородностей структуры, в том числе расслаивания, обусловленные потерей связи между слоями армирующего материала за счет недостатка связующего. Расслаивания могут также возникнуть при эксплуатации под влиянием механических напряжений, высокой температуры и других факторов, что может привести к критическим ситуациям.

Объем изделий из углепластиков может достигать до десятков метров квадратных. В большинстве случаев при контроле этих изделий затруднен двусторонний доступ к стенке изделия, что, в совокупности со спецификой структуры материала, серьезно ограничивает

**ПОТАПОВ**

Анатолий Иванович  
доктор технических наук,  
профессор, зав. кафедры  
«Приборостроение»

**СЯСЬКО**

Владимир Александрович  
кандидат технических  
наук, доцент

**ЧЕРТОВ**

Дмитрий Николаевич  
аспирант  
кафедры  
«Приборостроение»  
(Национальный  
минерально-сырьевой  
университет «Горный»,  
Санкт-Петербург)  
e-mail: apot@mail.ru

число видов НК для выявления указанных дефектов. В связи с этим представляет интерес использование вихретокового вида НК, основанного на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте. Рассматриваемые дефекты могут изменять картину вихревых токов в материале, что будет отражаться на выходном сигнале преобразователя. Для анализа изменения электромагнитного поля используют амплитудный, фазовый, амплитудно-фазовый и частотный методы вихретокового вида НК.

Рассмотрим задачи выявления расслоений и оценки их геометрических характеристик.

Объект контроля следует рассматривать как многослойную электропроводящую ферромагнитную пластину толщиной  $T$  и электропроводностью  $\sigma_i$  каждого слоя. Можно говорить о некотором интегральном значении электропроводности  $\sigma_n$  объекта контроля в объеме распространения вихревых токов. Исследования в соответствии с работой [2] показали, что для большинства изделий из углепластиковых материалов электропроводность  $\sigma_n$  составляет  $\sim 5...40$  кСм/м и может сильно варьироваться в одном изделии — до  $(\pm 10...15\%)$ .

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

Структурная схема трансформаторного четырехобмоточного вихретокового фазового преобразователя, использующего в качестве опорного сигнала напряжение на компенсационной обмотке, изображена на рис. 1.

Обмотка  $W_b$  записывается синусоидальным напряжением  $u_1(t)$  частоты  $f$ . Усиленное разностное (вносимое) напряжение  $\Delta u(t, T)$  поступает на фазовый детектор (ФД). Опорным сигналом для ФД служит напряжение  $u_k(t)$  с выхода компенсационной обмотки  $W_k$ . Постоянное

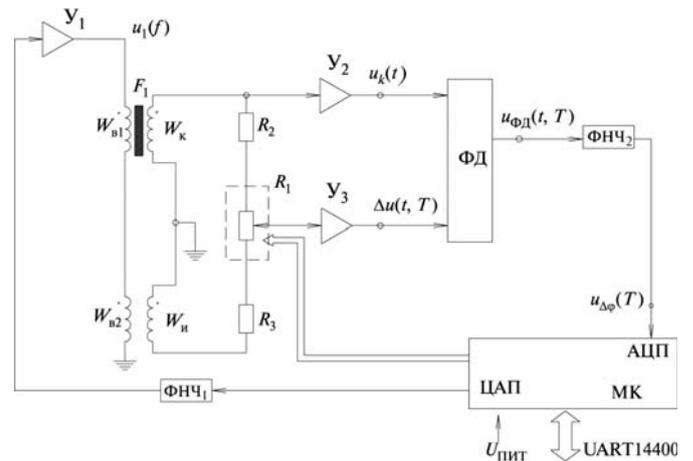


Рис. 1. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя:

$Y_1 - Y_3$  — усилители; ФД — фазовый детектор; ФНЧ<sub>1</sub> — ФНЧ<sub>2</sub> — фильтры низкой частоты;  $W_{b1}$ ,  $W_{b2}$  — обмотки возбуждения;  $W_k$  и  $W_n$  — дифференциально включенные компенсационная и измерительная обмотки; МК — микроконтроллер;  $R_1$  — управляемый цифровой балансировочный потенциометр;  $F_1$  — ферритовый броневый сердечник

напряжение  $U_{\Delta\phi}$  на выходе фильтра низкой частоты пропорционально разности фаз  $\Delta\phi$  между напряжением  $u_k(t)$  и разностным (вносимым) напряжением  $\Delta u(t, T)$ . Балансировка обмоток преобразователя производится цифровым потенциометром, управляемым микроконтроллером.

Используемые для большинства задач контроля и измерений чувствительные элементы, состоящие из двух соосных круговых обмоток, ось которых перпендикулярна поверхности изделия, в данном случае не подходят, так как создаваемый круговой вихревой ток не будет изменять свою картину при наличии внутренних расслаиваний материала. Предлагаемая схема обмоток чувствительного элемента преобразователя для выявления внутренних расслоений представлена на рис. 2.

Квадратная обмотка возбуждения  $W_{b2}$  одной из сторон устанавливается на изделие и создает вихревой ток  $i_b(t)$  (рис. 7, а). Измерительная обмотка  $W_n$  находится в плоскости обмотки  $W_2$  (обмотки  $W_{b1}$  и  $W_k$ , располагаемые на удалении от изделия, условно не показаны). Вносимое напряжение  $\dot{U}_{вн}$  на измерительной обмотке  $W_n$  будет зависеть, в том числе, от наличия расслоений, размеры которых сопоставимы с раз-

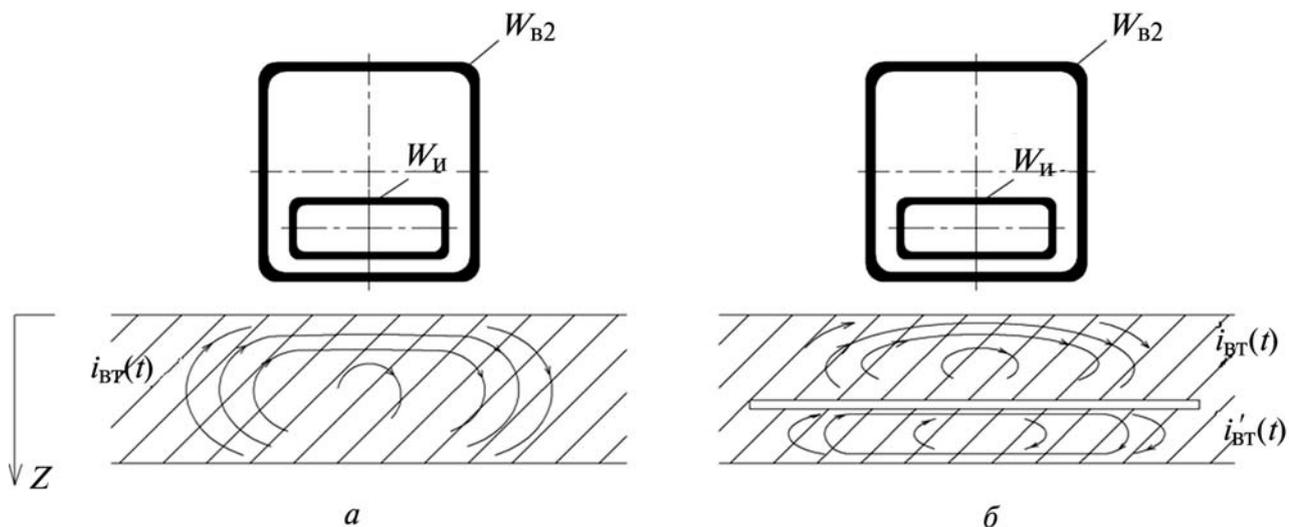


Рис. 2. Чувствительный элемент преобразователя для выявления внутренних расслоений в изделии:

$W_{B2}$  — обмотка возбуждения;  $W_{и}$  — измерительная обмотка;

*a* — распределение вихревых токов в плоскости обмоток без расслоения, *б* — распределение вихревых токов в плоскости обмоток при расслоении

мером зоны контроля чувствительного элемента. Размеры зоны контроля можно считать порядка  $2L \times 2L$ , где  $L$  — длина стороны обмотки  $W_2$ . 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. 2, б), что вызовет изменение амплитуды и фазы  $\tilde{U}_{вн}^*$ .

В качестве обобщенного параметра для данного преобразователя примем

$$\beta_z = L \sqrt{2\pi f \sigma_i \mu_0}. \quad (1)$$

Для обеспечения приемлемой чувствительности при контроле расслоений выберем значение  $\beta_z = 0,5 \dots 2$ . Максимальная толщина контролируемых изделий должна выбираться из условия  $T_{max} \approx 1,4\delta$  [3], где

$$\delta = 1 / \sqrt{\pi f \sigma_{и} \mu_0}. \quad (2)$$

Отсюда с учетом (1) и (2) следует, что оптимальные значения частоты преобразователей для контроля расслоений

$$f_o \approx 1,96 / (\pi \mu_0 \sigma_{и} T_{max}^2). \quad (3)$$

Для изделий с интегральной электропроводностью  $\sigma_{и} = 35$  кСм/м оптимальные частоты

для граничных значений  $T$  составят  $f_o(T = 10 \text{ мм}) \approx 140$  кГц и  $f_o(T = 2 \text{ мм}) \approx 1,4$  МГц. Для изделий с интегральной электропроводностью  $\sigma_i = 7$  кСм/м  $f_o(T = 10 \text{ мм}) = 704$  кГц и  $f_o(T = 2 \text{ мм}) = 17,5$  МГц. Для преобразователей с  $L = 6 \dots 15$  мм при рассчитанных значениях частот  $\beta_z \approx 1,4 \dots 3$ , что, в принципе, удовлетворяет условиям обеспечения оптимальной чувствительности.

На рисунке 3 представлена зависимость  $\tilde{U}_{вн}^* = \tilde{U}_{вн}^* / |\tilde{U}_0^*|$  от толщины изделия с электропроводностью  $\sigma_{и} = 35$  кСм/м для преобразователя с параметрами  $f \approx 0,9$  МГц и  $L = 15$  мм (кривая 1). Кривая 2 — зависимость  $\tilde{U}_{вн}^*$  от положения расслоения по глубине  $Z$  для изделия максимальной толщиной 3,6 мм. При толщине слоя углепластикового полотна 0,6 мм во всем диапазоне изменения  $Z = 0,6 \dots 3$  мм обеспечивается приемлемая чувствительность, позволяющая уверенно выявлять расслоения при указанной выше девиации  $\sigma_{и}$ . Линия отвода 4 иллюстрирует влияние  $h$ . Для подавления влияния зазора (а также эквивалентных зазору  $R_z$  и  $d$ ) необходимо электронной балансировкой с помощью управляемого потенциометра  $R_1$  смещать точку комплексного относительно вносимого напряжения на воздухе по мнимой оси на величину  $\tilde{U}_{of}^*$ , соответствующую толщине изделия  $T$ .

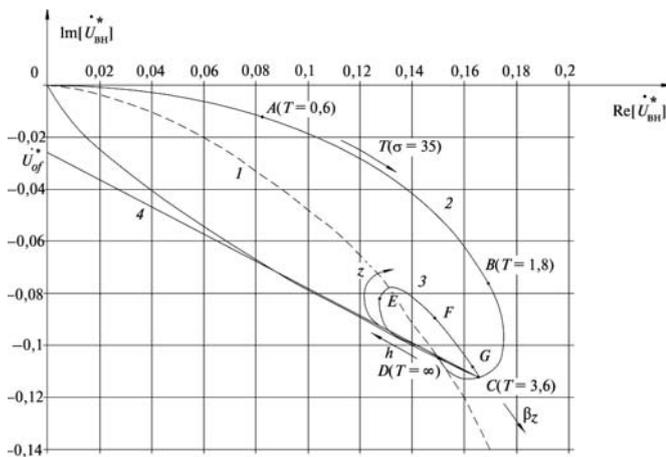


Рис. 3. Зависимость комплексного вносимого напряжения  $\dot{U}_{вн}^*$  от глубины залегания расслоения  $Z$  для изделия с параметрами  $T = 3,6$  мм,  $\sigma_i = 35$  кСм/м ( $E-Z = 0,6$  мм,  $F-Z = 1,8$  мм,  $G-Z = 3$  мм)

контроллеров 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 2...12 мм при электропроводности от 7...42 кСм/м. Влияние зазора подавляется в диапазоне до 0,3 мм, а шероховатости поверхности до  $R_z \approx 150$  мкм. Абсолютная погрешность измерения глубины залегания де-

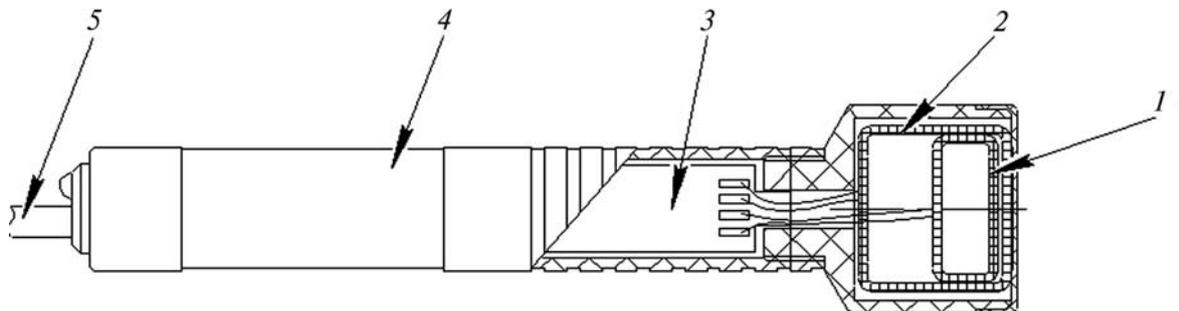


Рис. 4. Конструкция измерительного преобразователя:

1 — измерительная обмотка; 2 — возбуждающая обмотка; 3 — печатная плата; 4 — корпус; 5 — соединительный кабель к блоку обработки и представления информации

Для других значений  $\sigma_n$  и  $T$  годографы, рассчитанные в соответствии с определяемыми по формулам (1)—(3) параметрами, носят аналогичный характер с соответствующим масштабированием. Рассматриваемый преобразователь не позволяет плавно изменять частоту возбуждающего тока, поэтому необходимо оптимальным образом подобрать частоты нескольких преобразователей для перекрытия диапазонов измерения  $T$  и  $\sigma$ .

Градуировка преобразователей осуществляется на эталонных образцах с искусственными (заложеными) расслоениями, изготавливаемых по технологии производителя изделий. Семейство характеристик записывается в память микро-

фекта не превышает половины толщины слоя углепластикового полотна. Прибор «Константа ВД1» с комплектом преобразователей внедрен 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. L.J. van der Pauw. A method of measuring the resistivity and hall coefficient on lamellae of arbitrary shape. Philips Technical Review. Vol. 20. N 8. 1958/59. P. 220—224.
3. Потапов А.И., Сясько В.А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. СПб.: «Гуманистика», 2009. 904 с.

Статья поступила в редакцию 15.06.2012