

Вихретоковая дефектоскопия крупногабаритных углепластиковых изделий



**Потапов Анатолий
Иванович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет "Горный"», заведующий кафедрой «Приборостроение», профессор, д. т. н.



**Чертов Дмитрий
Николаевич**

ООО «КОНСТАНТА»,
ведущий специалист, к. т. н.

А. И. Потапов, Д. Н. Чертов

В статье рассмотрены принципы построения преобразователей и расчета их характеристик для выявления расслоений, трещин, вызванных многократными разрывами нитей, и измерения удельной электропроводности в различных направлениях в изделиях из углепластиков и углерод-углеродных композиционных материалов. Приведены конструкция и основные метрологические характеристики разработанных преобразователей.

В последние годы 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 (связывающего), соблюдения техпроцесса производства и т. д.

В процессе производства изделий из углепластиковых материалов не всегда выдерживаются заданные параметры (толщина стенки, структура, электропроводность), могут образовываться различные виды неоднородностей структуры (пористость, волнистость волокон, посторонние включения, расслоения и трещины), являющиеся местами локализации процесса разрушения [1]. При эксплуатации также могут возникать трещины и внутренние объемные разрушения вследствие циклических и ударных механических нагрузок.

Указанные дефекты (рис. 1) снижают прочностные характеристики изделий и их



Рис. 1. Основные дефекты в изделиях из углепластиков

Рассмотрим решение задачи выявления расслоений и оценки их геометрических характеристик.

Используемые для большинства задач вихретокового контроля и измерений классические первичные измерительные преобразователи, представляющие собой круговые обмотки, ось которых перпендикулярна поверхности изделия (рис. 2), в данном случае неприменимы, т. к. создаваемый круговой вихревой ток не будет изменять свою картину при наличии внутренних расслоений материала и, соответственно, не приведет к изменению вносимого напряжения измерительной обмотки [2].

Для выявления расслоений необходимо возбуждать вихревые токи, которые будут иметь составляющую, перпендикулярную к расслоению и пересекающую его (рис. 3).

Для выявления такого вида дефектов предлагается использовать вихретоковые преобразователи с линейными участками проводников для формирования вихревых токов в изделии [3]. Линейный участок проводника, параллельный поверхности электропроводящего изделия, с гармоническим током $i(t)$, а так-

долговечность, определяют необходимость проведения комплексного контроля на всех этапах жизненного цикла углепластиковых конструкций. Представляет интерес использование методов вихретокового вида НК, обладающих чувствительностью к изменению электропроводящих свойств изделий, обусловленных описанными выше дефектами.

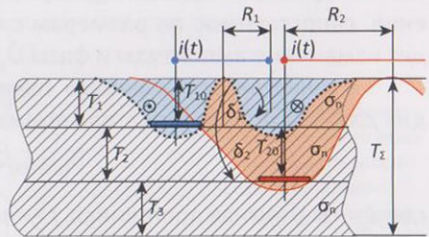


Рис. 2. Картина плотности вихревых токов классических круговых измерительных преобразователей



Рис. 3. Картина вихревых токов, при которой возможно выявление расслоений

же картина создаваемых им вихревых токов $i_{\text{BT}}(t)$ в сечении, проходящем через проводник перпендикулярно к поверхности, представлены на рис. 4а. В случае наличия расслоения картина вихревых токов претерпит изменения, возникнут два контура вихревых токов $i_{\text{BT}}(t)$ и $i'_{\text{BT}}(t)$, представленные на рис. 4б. Здесь же представлена предлагаемая схема обмоток линейного тангенциального первичного измерительного преобразователя.

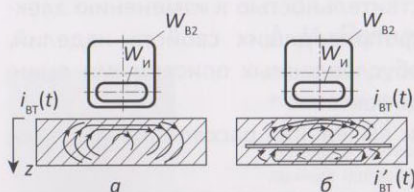


Рис. 4. Чувствительный элемент преобразователя для выявления внутренних расслоений: W_{B2} — обмотка возбуждения, $W_{\text{И}}$ — измерительная обмотка. Картина распределения вихревых токов в плоскости обмоток: а — без расслоения, б — при расслоении

нии поверхности изделия преобразователь будет пересекать расслоение, сопоставимое по размерам с его зоной контроля, то произойдет изменение амплитуды и фазы $\dot{U}_{\text{вн}}$.

В качестве обобщенного параметра вихретокового контроля для данного преобразователя примем величину

$$\beta_z = L\sqrt{2\pi f\sigma_{\text{и}}\mu_0}, \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, f — частота, $\sigma_{\text{и}}$ — интегральная удельная электропроводность.

Для обеспечения приемлемой чувствительности при контроле расслоений величину β_z будем выбирать на уровне порядка $0,5 \div 2$. Максимальная толщина контролируемых изделий рассчитывается из условия $T_{\text{max}} \approx 1,4\delta$, где

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

Из этого с учетом (1) и (2) следует, что оптимальное значение частоты преобразователей для контроля расслоений равно:

$$f_0 \approx 1,96 / (\pi\mu_0\sigma_{\text{и}}T_{\text{max}}^2). \quad (3)$$

Для изделий с интегральной электропроводностью $\sigma_{\text{и}} = 35 \text{ кСм/м}$ оптимальные частоты для граничных значений T соста-

Квадратная обмотка возбуждения W_{B2} одной из сторон длиной L устанавливается на изделие и создает вихревой ток $i_{\text{BT}}(t)$. Измерительная обмотка $W_{\text{И}}$ находится в плоскости обмотки W_{B2} . Вносимое напряжение $\dot{U}_{\text{вн}}$ на измерительной обмотке $W_{\text{И}}$ будет зависеть, в том числе, от наличия расслоений, их размеров и глубины их залегания. Если при сканирова-

вят $f_o (T = 5 \text{ мм}) \approx 570 \text{ кГц}$ и $f_o (T = 2 \text{ мм}) \approx 1,4 \text{ МГц}$. Для изделий с интегральной электропроводностью $\sigma_i = 7 \text{ кСм/м}$ $f_o (T = 5 \text{ мм}) = 2,8 \text{ МГц}$ и $f_o (T = 2 \text{ мм}) = 17,5 \text{ МГц}$. Для преобразователей с $L = 6 \dots 15 \text{ мм}$ при рассчитанных значениях частот $\beta_z \approx 1,4 \dots 3$, что, в принципе, удовлетворяет условиям обеспечения оптимальной чувствительности.

На рис. 5 представлена зависимость комплексного вносимого относительного напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^* = \dot{U}_{\text{вн}} / |\dot{U}_0|$ от глубины расположения расслоения Z в изделии с интегральной удельной электропроводностью $\sigma_{\text{и}} = 35 \text{ кСм/м}$ для преобразователя с параметрами $f \approx 0,9 \text{ МГц}$ и $L = 15 \text{ мм}$ (кривая 3). Кривая 2 — зависимость $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от толщины изделия при максимальной толщине 3,5 мм. При толщине слоя углепластикового полотна 0,5 мм во всем диапазоне изменения Z от 0,5 до 3 мм обеспечивается приемлемая чувствительность, позволяющая уверенно выявлять расслоения при указанной выше девиации $\sigma_{\text{и}}$. Линия отвода 4 иллюстрирует влияние h . Для подавления влияния зазора (а также эквивалентных зазору шероховатости R_z и криволинейности изделия d) необходимо электронной балансировкой с использованием управляемого потенциометра R_1 (рис. 6) смещать точку комплексного относительного вносимого напряжения на воздухе по мнимой оси на величину \dot{U}_{of}^* , соответствующую толщине изделия T .

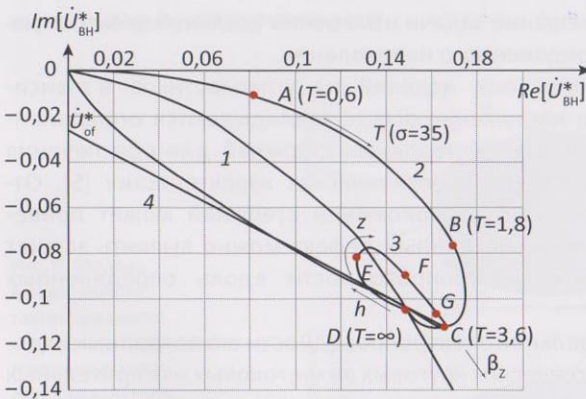


Рис. 5. Зависимость комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от глубины залегания расслоения Z для изделия с параметрами $T = 3,5 \text{ мм}$, $\sigma_{\text{и}} = 35 \text{ кСм/м}$ (E: $Z = 0,6 \text{ мм}$, F: $Z = 1,8 \text{ мм}$, G: $Z = 3 \text{ мм}$)

Структурная схема трансформаторного четырехобмоточного вихретокового преобразователя, реализующего фазовый метод и использующего в качестве опорного сигнала напряжение на компенсационной обмотке, изображена на рис. 6 [4].

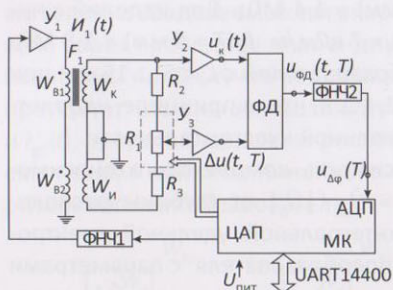


Рис. 6. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя: $Y_1 - Y_3$ — усилители, ФД — фазовый детектор, ФНЧ1 — ФНЧ2 — фильтры низкой частоты, W_{B1}, W_{B2} — обмотки возбуждения, W_K и $W_{И}$ — дифференциально включенные компенсационная и измерительная обмотки, МК — микроконтроллер, R_1 — управляемый цифровой балансирующий потенциометр, F_1 — ферритовый броневого сердечник

На основании всего вышеописанного был разработан вихретоковый преобразователь, конструкция которого представлена на рис. 7.

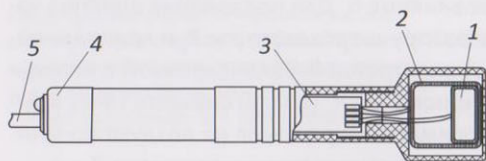


Рис. 7. Конструкция измерительного преобразователя:
1 — измерительная обмотка $W_{И}$;
2 — обмотка возбуждения W_{B2} ;
3 — печатная плата; 4 — корпус;
5 — соединительный кабель к блоку обработки и представления информации

Рассмотрим решение задачи измерения удельной электропроводности вдоль определенного направления.

При конструировании изделий из углепластиков в зависимости от характера нагружения всегда закладываются определенные направления укладки углеродных стержней для обеспечения необходимых прочностных и механических характеристик [5]. Отклонение от правильного расположения стержней может привести к разрушению изделия. Данный дефект можно выявить за счет измерения удельной электропроводности вдоль определенных направлений [6].

Измерение удельной электропроводности анизотропных изделий с помощью классических круговых вихретоковых измерительных преобразователей является некорректным решением, так как измеряется интегральная удельная электропроводность изделия по всем направлениям.

В связи с этим был разработан вихретоковый преобразователь тангенциального типа, аналогичный по конструкции представленному на рис. 4.

Для измерения удельной электропроводности в определенном направлении используется горизонтальная «линейная» часть вихревых токов (рис. 8).

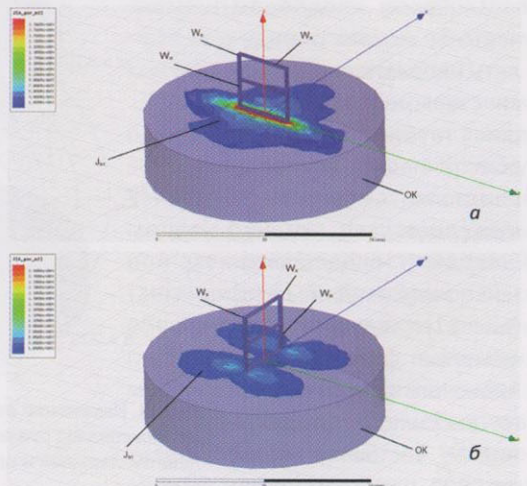
В связи со сложным аналитическим описанием такого преобразователя была разработана конечно-элементная модель вихретокового первичного тангенциального трехобмоточного накладного измерительного преобразователя и плотности распределения вихревых токов, представленная на рис. 9.

В объекте контроля смоделировано расположение углеродных стержней параллельно оси X (зеленая ось) за счет сильной анизотропии удельной электропроводности ($\sigma_x = 40 \text{ кСм/м}$, $\sigma_y = 5 \text{ кСм/м}$). Максимальная плотность вихревых токов находится под преобразователем (рис. 9а), когда он расположен вдоль волокон, и около углов преобразователя, когда он расположен поперек волокон (рис. 9б). Это объясняется наличием вихревых токов рассеяния, которые пытаются замкнуться между собой по траектории с малым сопротивлением.



Рис. 8. Картина распределения вихревых токов в плоскости обмоток

Рис. 9. Модель вихретокового тангенциального накладного первичного измерительного преобразователя:
 а — преобразователь установлен вдоль направления волокон,
 б — преобразователь установлен поперек направления волокон



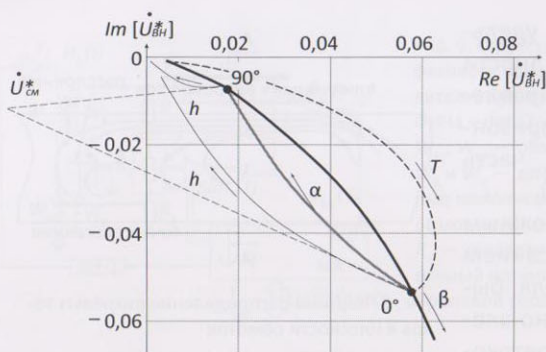


Рис. 10. Зависимость комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от контролируемого и мешающих параметров

При повороте преобразователя относительно направления стержней происходит уменьшение влияния вихревых токов на первичный измерительный преобразователь более чем в 10 раз.

На рис. 10 представлен годограф зависимости комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от контролируемого и мешающих параметров.

Для отстройки от влияния толщины изделия выбирается частота возбуждения вихревых токов, при которой глубина проникновения вихревых токов будет максимально велика, но меньше толщины изделия. При этом будет измеряться интегральная удельная электропроводность по глубине.

Также подбором частоты можно определить направление укладки стержней на некоторой глубине изделия, обеспечивая контроль не только поверхностных слоев.

Из представленной зависимости $\phi(\alpha)$ (рис. 11) следует, что изменение фазы ϕ комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ составляет больше 30° при изменении

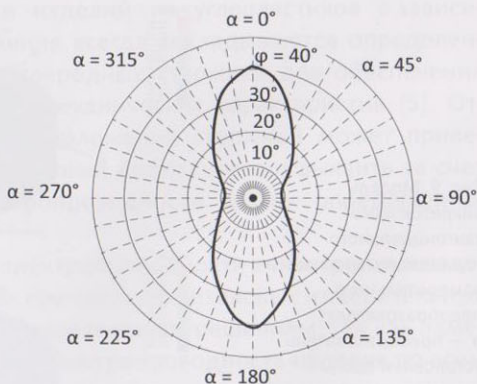


Рис. 11. Изменение фазы относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ при изменении угла между направлением стержней и измерительным преобразователем

удельной электропроводности от 5 до 40 кСм/м, что позволяет с высокой точностью определить направление укладки стержней. Следовательно, тангенциальный преобразователь обеспечивает измерение удельной электропроводности изделия с учетом его анизотропии.

В изделии с плоским 2D-армированием зависимость $\phi(\alpha)$ будет иметь вид четырех лепестков.

Рассмотрим решение задачи выявления трещин, вызванных многократными разрывами нитей.

При однонаправленном армировании углеродных композиционных материалов использование вихретокового преобразователя с чувствительным элементом, ось которого перпендикулярна плоскости объекта контроля, не позволяет выявлять трещины, вызванные разрывами нитей. Для решения данной задачи также предлагается использовать вихретоковый тангенциальный преобразователь. В качестве обобщенного параметра предлагается принять величину β_z :

$$\beta_z = L\sqrt{2\pi f\mu_0\sigma_n}, \quad (4)$$

где L — длина участка обмотки возбуждения, параллельного объекту контроля.

Оптимальная чувствительность для выявления трещин обеспечивается при значении $\beta_z = 5 \div 20$. Точка отсчета фазы сдвигается по

комплексной плоскости в точку U_{cm} .

Была построена конечно-элементная модель преобразователя над анизотропным объектом контроля с дефектом (рис. 12).

Исходя из годографа комплексного относительного вносимого напряжения (рис. 13), полученного с помощью разработанной модели с учетом девиации удельной электропроводности изделий, тангенциальный преобразователь обеспечивает выявление трещин, глубиной от 0,5 мм, вызванных многократными разрывами нитей.

Градуировка преобразователей производится на аттестованных контрольных образцах

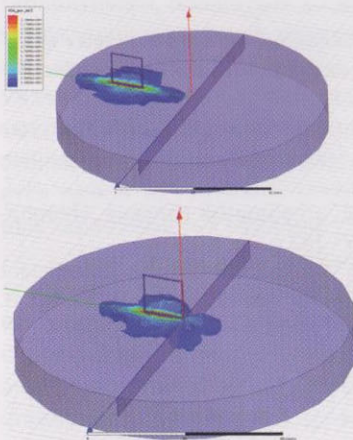


Рис. 12. Модель вихретокового тангенциального накладного первичного преобразователя над анизотропным объектом контроля с трещиной

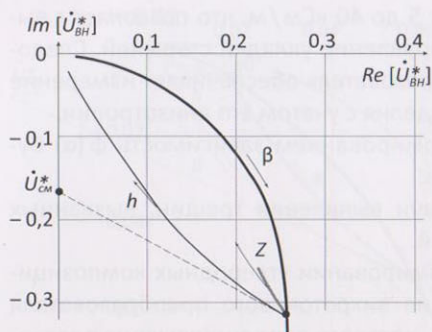


Рис. 13. Зависимость комплексного относительного вносимого напряжения преобразователя от глубины трещины

с искусственными трещинами. Контрольные образцы изготавливаются из материалов с известными свойствами, повторяющими структуру реальных объектов контроля.

В случаях возникновения необходимости калибровки приборов в производственных условиях разработанные методики одноточечной и двухточечной калибровки обеспечивают заданные погрешности результатов контроля продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. / Под ред. Дж. Дюбина. Пер. с англ. А. Б. Геллера, М. М. Гельмонта. Кн. 1. — М.: Машиностроение, 1988. — 448 с.
2. Неразрушающий контроль / Справочник в 8 томах под общей ред. В. В. Клюева. Т. 2. Кн. 2: Вихретоковый контроль. — М.: Машиностроение, 2006. — 688 с.
3. Сясько В. А., Чертов Д. Н. Выявление расслоений углепластиковых материалов с использованием тангенциальных вихретоковых преобразователей. — В мире НК. 2012. № 2 (56). С. 19–21.
4. Потапов А. И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий / Научное, методическое, справочное пособие. — СПб.: Гуманистика, 2009. — 904 с.
5. Мелешко А. И., Половников С. П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. — М.: Сайнс-Пресс, 2007—192 с.
6. Pauw L. J. van der. 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.