УДК 620.179

А.И.ПОТАПОВ, *д-р техн. наук, профессор, apot@mail.ru*
В.А.СЯСЬКО, *канд. техн. наук, доцент, 9334343@gmail.com*
Д.Н.ЧЕРТОВ, *аспирант, d.n.chertov@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

A.I.POTAPOV, *Dr. in eng. sc., professor, apot@mail.ru*
V.A.SYASKO, *PhD in eng. sc., associate professor, 9334343@gmail.com*
D.N.CHERTOV, *post-graduate student, d.n.chertov@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА

Особенности технологического процесса производства конструкций из углепластика могут привести к несоблюдению пропорций армирующего материала и связующего, отклонению толщины стенки, пористости и разрыву нитей. Сложные условия эксплуатации могут привести к внутренним расслоениям и образованию трещин. Необходимо проведение комплексного контроля конструкций из углепластика на всех стадиях жизненного цикла. Для этого целесообразно использовать вихретоковый вид неразрушающего контроля. Были разработаны вихретоковые фазовые и частотный преобразователи для измерения электропроводности, толщины стенок, выявления расслоений и трещин, а также измерения их площади и глубины. Рассмотрены принципы расчета и оптимизации параметров преобразователей, подавление влияние мешающих параметров.

***Ключевые слова*:** углепластик, электропроводность, толщина, вихретоковый, расслоение, трещина, измерительный преобразователь.

EDDY CURRENT TESTING OF CFRP STRUCTURES

Specific features of technological processes of manufacturing carbon-fiber-reinforced constructions can cause non-observance of proportions of a reinforcing material and binding, a deviation of wall thickness, porosity and rupture of threads. Difficult service conditions can lead to internal volume stratifications and formation of cracks. Above told defines necessity of carrying out of complex control of carbon-fiber-reinforced constructions at all stages of their life cycle. It is expediently to use the Eddy Current NDT for that purposes. The device with set of Eddy Current Phase and Eddy Current Frequency transducers have been developed for measurement electro-conductivity and wall thickness of constructions, detection of cracks and internal volume stratifications, and also their depth and the area. Principles of calculation and optimization of parameters of transducers, influence suppression of stirring parameters are considered.

***Key words*:** carbon fiber reinforced plastic, conductivity, wall thickness, eddy current, delamination, crack, measuring transducer.

В последние годы в авиакосмической технике существенно возросло применение конструкционных углепластиковых материалов, имеющих ряд уникальных характеристик. В процессе производства и при эксплуатации могут образоваться различные виды неоднородностей структуры и дефекты, которые являются местами локализации процесса разрушения.

Представляет интерес использование вихретокового вида контроля изделий из углепластиков, основанного на анализе

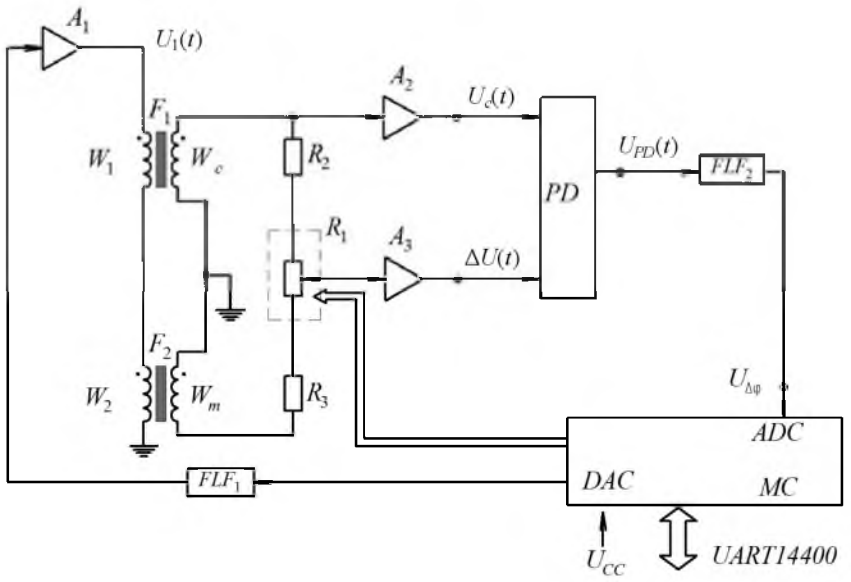


Рис.1. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя

$A_1 - A_3$ – усилители; *PD* – фазовый детектор; W_1 и W_2 – обмотки возбуждения; W_e и W_m –компенсационная и измерительная обмотки; F_1 и F_2 – ферритовые сердечники; *MC* – микроконтроллер; R_1 – управляемый цифровой балансировочный потенциометр

взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте. Описанные дефекты изменяют картину вихревых токов в материале, что обуславливает изменение выходного сигнала преобразователя.

Рассмотрим решение задач измерения интегральной электропроводности, толщины стенки, выявления расслоений и трещин, а также оценки их геометрических характеристик.

Схема трансформаторного четырехобмоточного вихретокового фазового преобразователя для измерения электропроводности, толщины стенки и поиска расслоений изображена на рис.1.

Для анализа характеристик измерительного преобразователя удобно использовать обобщенный параметр

$$\beta = R\sqrt{2\pi f\sigma_i\mu_0}\,, \qquad (1)$$

где R – эквивалентный радиус обмотки возбуждения; f – частота тока возбуждения; σ_i – интегральная электропроводность материала; μ_0 – магнитная постоянная.

В общем случае отклонение от схемы армирования и соотношения пропорций, пористость, посторонние включения, а также внутренние объемные разрушения будут приводить к изменению σ_i.

Для обеспечения приемлемой чувствительности при измерении электропроводности σ величину β_σ следует выбирать на уровне 5-20. В общем случае глубина проникновения вихревых токов равна

$$\delta = 1/\sqrt{2\pi f\sigma_i\mu_0}\,. \qquad (2)$$

Для рассматриваемой задачи измерения электропроводности минимально допустимое значение толщины $T_{min} \approx 1{,}7\delta$. Из соотношений (1), (2) следует, что оптимальное значение частоты для измерения электропроводности равно

$$f_{\sigma o} \approx 2{,}89/(\pi\mu_0\sigma T_{min}^2). \qquad (3)$$

Зависимость комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_i^* = \dot{U}_i^*/|\dot{U}_0|$ представлена на рис.2 (кривая 1). Для подавления влияния зазора (кривые 2 и 3) необходимо электронной балансировкой сместить точку комплексного относительного вносимого напряжения на воздухе по мнимой оси на величину $\dot{U}_{of}^*$.

Для обеспечения приемлемой чувствительности при измерении T величину β_T

следует выбирать на уровне 0,5-2. Максимально допустимое значение измеряемой толщины изделия $T_{max} \approx 0{,}7\delta$. Из этого с учетом выражений (1) и (2) следует, что оптимальное значения частоты преобразователей для измерения толщины

$$f_{To} \approx 0{,}49/(\pi\mu_0\sigma T^2_{max}). \quad (5)$$

На рис.3 представлена рассчитанная зависимость $\dot{U}_i^*$ от толщины изделия для $\sigma_i = 35$ кСм/м при $f = 35$ кГц и $R = 15$ мм (кривая 1). Во всем диапазоне изменения T от 2 до 10 мм обеспечивается приемлемая чувствительность, позволяющая обеспечить абсолютную погрешность измерения на уровне ± 0,01T в нормальных условиях. Однако изменение указанных выше мешающих параметров будет вызывать дополнительную погрешность измерения.

Линия отвода 3 иллюстрирует влияние h в точке измерения B. Изменение зазора до 0,3 мм вызовет дополнительную погрешность измерения порядка 0,1T. Подавление влияния зазора выполняется аналогично задаче измерения электропроводности.

Влияние вариации электропроводности изделия иллюстрируют линии $B'BB''$ и $C'CC''$, соответствующие изменению на ± 10 % от номинального значения и показывающие, что дополнительная погрешность измерения может достигать величины порядка ±(0,1-0,15)T в зависимости от диапазона измерения.

Контроль σ_i позволяет подавить влияние девиации электропроводности на результат измерения T. При этом обеспечивается погрешность измерения $\Delta T < \pm(0{,}01\text{-}0{,}03)T$ в зависимости от изменения электропроводности.

Чувствительный элемент преобразователя для выявления расслоений состоит из квадратных обмоток возбуждения, одна из которых устанавливается на изделие и создает вихревой ток, и измерительной и компенсационной обмоток, находящихся в плоскости обмоток возбуждения. Вносимое напряжение на измерительной обмотке будет зависеть и от наличия расслоений. Размеры зоны контроля составляют примерно $2L \times 2L$, где L – длина стороны обмотки W_2.

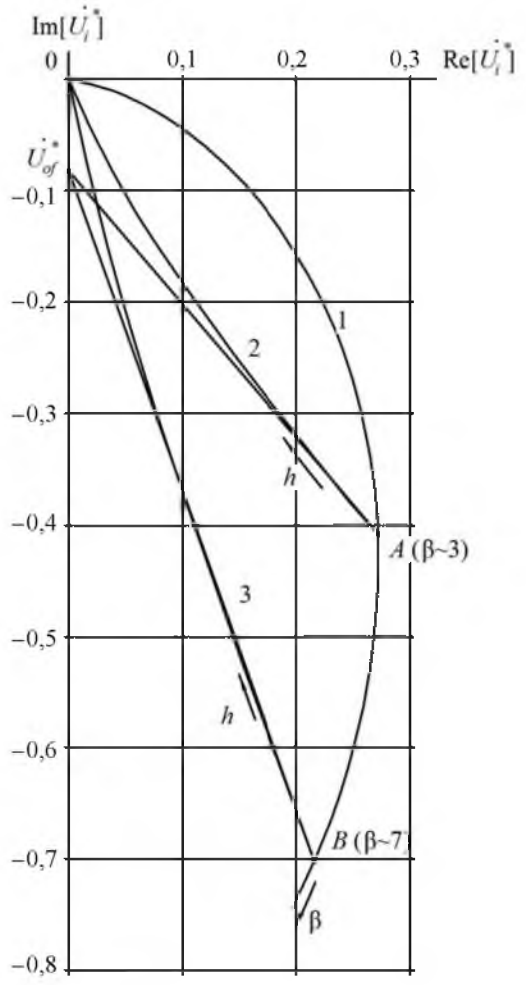


Рис.2. Зависимость комплексного вносимого напряжения $\dot{U}_i^*$ от контролируемого и влияющих параметров при измерении электропроводности

В качестве обобщенного параметра для данного преобразователя примем величину

$$\beta_z = L/\sqrt{2\pi f\sigma_i\mu_0}\,. \quad (6)$$

Для обеспечения приемлемой чувствительности при контроле расслоений величину β_z следует выбирать на уровне 0,5-2. Максимальная толщина контролируемых изделий выбирается из условия $T_{max} \approx 1{,}4\delta$. Из этого с учетом выражений (1) и (2) следует, что оптимальное значения частоты преобразователей для контроля расслоений

$$f_{To} \approx 1{,}96/(\pi\mu_0\sigma T^2_{max}). \quad (7)$$

На рис.4 представлена зависимость $\dot{U}_i^*$ от положения расслоения по глубине Z изделия с электропроводностью $\sigma_i = 35$ кСм/м для

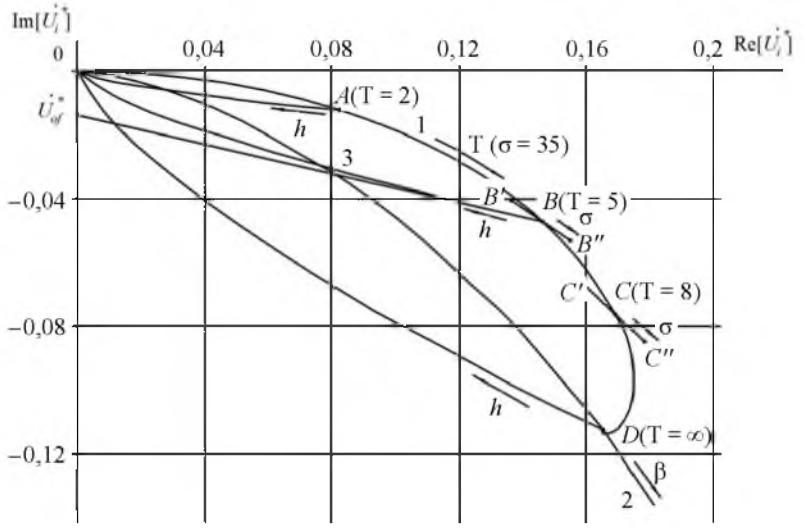


Рис.3. Зависимость комплексного вносимого напряжения $\dot{U}_i^*$ от контролируемого и влияющих параметров при измерениях толщины изделия

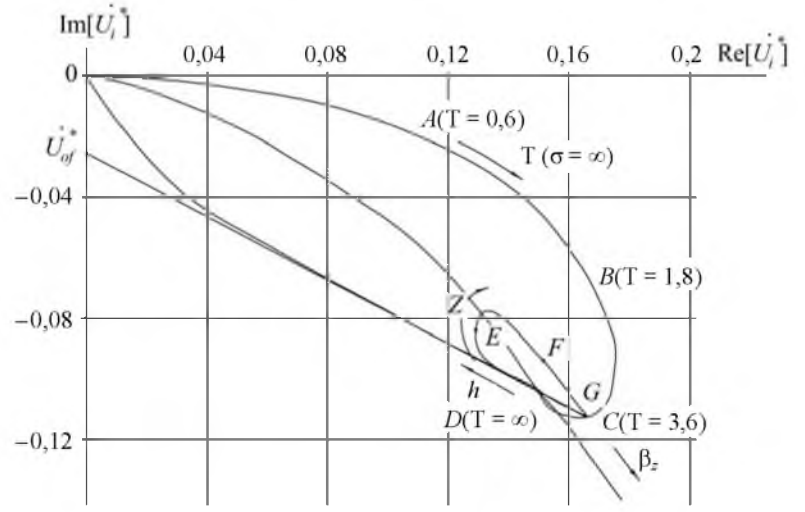


Рис.4. Зависимость комплексного вносимого напряжения $\dot{U}_i^*$ от глубины залегания расслоения Z для изделия с параметрами T = 3,6 мм, σ_i = 35 кСм/м (E: Z = 0,6 мм, F: Z = 1,8 мм, G: Z = 3 мм)

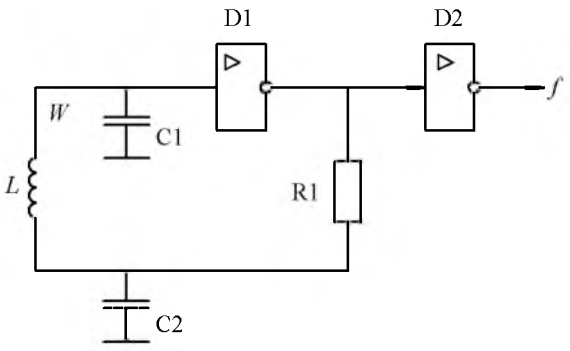


Рис.5. Автогенераторный вихретоковый частотный преобразователь

W – обмотка преобразователя; L – индуктивность обмотки; C1, C2 – конденсаторы; R1 – резистор обратной связи; D1, D2 – инверторы

преобразователя с параметрами $f \approx 0{,}9$ МГц и L = 15 мм. Подавление влияния зазора выполняется аналогично задаче измерения электропроводности.

Для выявления поверхностных трещин небольшой глубины (0,5-1 мм в процессе развития) вихретоковый фазовый метод не оптимален, так как конструктивно и схемотехнически трудно обеспечить $\delta \approx 0{,}3$-$0{,}5$ мм и $\beta \approx 20$ при низкой электропроводности изделий из углепластиков. Для этих целей представляет интерес использование вихретоковых частотных преобразователей, построенных на базе автогенераторной схемы (рис.5), частота f на выходе которого опре-

деляется вносимой индуктивностью от вихревых токов, и, соответственно, наличия поверхностных трещин, разрывающих контур вихревого тока в изделии.

Можно говорить о некотором интегральном значении электропроводности σ_i объекта контроля в объеме распространения вихревых токов, изменяющемся в зависимости от электропроводности изделия и его слоев, а также от наличия (отсутствия) дефектов (поверхностных трещин).

Метод не обеспечивает отстройки от влияния зазора, поэтому контроль следует проводить в динамическом режиме. При этом плавные изменения зазора, шероховатости и радиуса будут приводить к плавным изменения *f*, в то время как пересечение трещины даст резкое, скачкообразное изменение *f* (на 5-10 %), что фиксируется микроконтроллером прибора.

Разработанный комплект преобразователей в составе прибора «Константа К6» позволяет производить комплексный контроль параметров крупногабаритных деталей и конструкций из углепластиков толщиной от 2 до 12 мм и электропроводностью от 5 до 40 кСм/м при их формовании, выходном контроле и в процессе эксплуатации в составе изделий авиакосмической техники.