

## АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ПРЯМЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Салахудинова Аделя Мусовна*

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический  
университет им А. Н. Туполева – КАИ»  
*sadelia999@gmail.com*

Полимерные композитные материалы (ПКМ), армированные углеродным волокном, обладают высокой прочностью и низким весом, вызывая большой интерес в использовании при проектировании летательных аппаратов. Низкая по сравнению с металлами проводимость ПКМ создает определенные трудности в изучении их электромагнитных свойств, требуемых для понимания и прогнозирования прямого или косвенного воздействия электромагнитных волн, их поглощения или отражения. В работе дается анализ механизмов использования некоторых современных экспериментальных прямых методов определения электрических характеристик углепластиков для выбора и последующего их применения в разработке и исследовании радиопоглощающих структур из КМ.

К настоящему времени в литературе представлены различные экспериментальные методы вычисления электрических характеристик ПКМ. Выделим из них основные три метода, теоретические основы и стандартное использование которых достаточно полно рассмотрено в работе [1].

1) Метод «Четыре точки»: способ основан на измерении электрического сопротивления постоянного тока, который вводится из стабилизированного источника питания. Электропроводность  $\sigma_u$ , соответствующую проводимости в направлении  $u$ , можно вычислить следующим образом:

$$\sigma_u = d/RS,$$

где  $R$  – сопротивление материала,  $d$  – толщина,  $S$  – сечение.

В работах [2...4] построена аналитическая модель метода для определения проводимости с учетом равномерного распределения тока в образце.

2) Поперечная электромагнитная ячейка (ПЭМ): ПЭМ (рис. 1) является коаксиальной структурой, которая обеспечивает распространение плоских волн в полосе частот от 100 кГц до 1 ГГц. Принцип состоит в измерении входных потерь для данного материала и определения сопротивления  $R_L$ .

Предполагая, однородность композита и равномерное распределение тока по толщине  $d$ , можно вывести радиальную электропроводность  $\sigma_{rad}$  из сопротивления  $R_L$ .

$$\sigma_{rad} = \frac{1}{2\pi d R_L} \ln \left( \frac{R_{ext}}{R_{int}} \right)$$

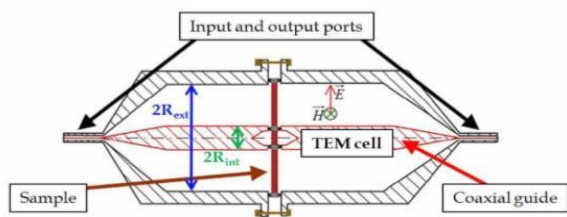


Рис. 1. Ячейка ПЭМ

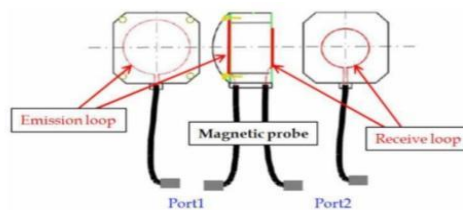


Рис. 2. Магнитный зонд

3) Магнитный зонд (рис. 2): метод заключается в измерении нормального магнитного поля с наличием и без наличия композиционного материала между двумя петлями (контурами).

Если предположить, что композит является однородным и что токи, индуцированные контуром излучения (радиуса  $a$ ), равномерно распределены по толщине  $d$  (без эффекта кожи), мы можем получить электропроводность:

$$f_c = \frac{1.4}{\pi \mu_0 a d \sigma_{cir}} \ll \frac{1}{d^2 \pi \mu_0 \sigma_{cir}}, \sigma_{cir} = \frac{1.4}{\pi \mu_0 a d f_c}.$$

Существующие экспериментальные подходы к исследованию электрических характеристик ПКМ требуют сложных вычислений, использования и изготовления дорогостоящего оборудования и образцов, проведения трудоемких, чувствительных к погрешностям экспериментов. Поэтому, численное моделирование представляет несомненный интерес для понимания электрических характеристик материала ПКМ.

### Литература

1. Alexandre Piche, Ivan Revel, Gilles Peres (2011). Experimental and Numerical Methods to Characterize Electrical Behaviour of Carbon Fiber Composites Used in Aeronautic Industry, *Advances in Composite Materials – Analysis of Natural and Man-Made Materials*, Dr.Pavla Tesinova (Ed.).
2. Park J. B., Hwang T. K., Kim H. G., Doh Y. D. “Experimental and numerical study of the electrical anisotropy in unidirectional carbon-fiber-reinforced polymer composite”, *Smart Mater. Struct.* 16 (2007) 57–66.
3. Busch R., Ries G., Werthner H., Kreiselmeyer G., Saemann-Ischenko G. “New aspects of the mixed state from six-terminal measurements on Bi2Sr2CaCu2Ox single crystals”, 1992, *Phys. Rev. Lett.* 69 522–5.
4. J. L., Espinoza O. J. S., Baggio-Saitovitch E “Influence of the anisotropy in the c-axis resistivity measurements of high-Tc superconductors”, 1999.