



УДК 620.179:678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-11-11

**МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ ВХОДНЫХ СЛАБО
НАПОЛНЕННЫХ СЛОЕВ ГРАДИЕНТНЫХ
РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Е.М. Шульдешов

В.В. Лепешкин

А.М. Романов

кандидат технических наук

Октябрь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Е.М. Шульдешов¹, В.В. Лепешкин¹, А.М. Романов¹

МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВХОДНЫХ СЛАБО НАПОЛНЕННЫХ СЛОЕВ ГРАДИЕНТНЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследованы диэлектрические характеристики входных слабо наполненных слоев градиентных радиопоглощающих полимерных композиционных материалов методом неразрушающего контроля. Описаны способы измерения комплексной диэлектрической проницаемости образцов. Описан стенд для проведения неразрушающего контроля комплексной диэлектрической проницаемости входных слоев градиентных радиопоглощающих структур. Описаны преимущества данного метода, рассмотрены случаи наиболее целесообразного применения.

Ключевые слова: радиопоглощающий материал, диэлектрическая проницаемость, градиентная радиопоглощающая структура, неразрушающий контроль.

Е.М. Shuldeshov, V.V. Lepeshkin, А.М. Romanov

METHOD OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF COMPLEX DIELECTRIC PERMITTIVITY OF INPUT POORLY FILLED LAYERS OF GRADIENT RADAR-ABSORBING POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

Dielectric characteristics of input poorly filled layers of gradient radar-absorbing polymeric composite materials were investigated by nondestructive control method. Methods of measurement of complex dielectric permittivity of samples are described. A stand for carrying out non-destructive testing of complex dielectric permittivity of input layers of radar-absorbing gradient structures is described. Advantages of this method are described, cases of the most reasonable application are considered.

Keywords: radar-absorbing material, dielectric permittivity, gradient radar-absorbing structure, non-destructive testing.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время диэлектрические свойства слоев многослойных градиентных радиопоглощающих материалов оцениваются традиционными методами – по методикам, которые базируются на применении аналоговых измерительных средств, измерительных линий и объемных резонаторов в узком диапазоне частот [1]. Так, для перекрытия диапазона частот от 1 до 40 ГГц потребуются набор панорамных измерителей КСВн типа P2-53÷P2-67 в количестве 9–10 шт. или типа P2-111÷P2-117 в количестве 7 шт. и измерительные волноводные линии (ИВЛ), коэффициент перекрытия диапазона частот которых не более 1,5–2.

Измерения диэлектрических свойств материалов в объемном резонаторе проводятся в еще более узком диапазоне частот – от 1 до 12 ГГц, как правило на частотах 3 или 10 ГГц, и связаны с трудоемким процессом изготовления и подготовки образцов под размеры волноводов измерительных линий или объемного резонатора. Так, для измерений на частоте 10 ГГц (измерительная линия P1-28) образец имеет размеры 10×23 мм и вырезается из пластины больших размеров. Качество изготовления образцов в значительной степени определяет погрешность измерений характеристик. Кроме того, неоднородность плотности или неравномерное распределение волокнистого наполнителя в плоскости пластины приводят к дополнительным погрешностям измерений, распределенных случайным образом. Поэтому измеренные свойства характеризуют скорее диэлектрические свойства конкретного измеряемого образца, а не материала.

Методики и аппаратура не обеспечивают возможности получения результатов измерений в широкой полосе частот. Измерение возможно только по отдельным частотным точкам. Все эти трудности усугубляются при измерении диэлектрической проницаемости входных слоев многослойных градиентных структур. Для обеспечения плавного согласования со свободным пространством действительная часть диэлектрической проницаемости входных слоев не должна сильно отличаться от 1 (не более 2), а тангенс угла диэлектрических потерь должен составлять не более 0,2. Такие слои обычно выполняют на основе разреженного или вспененного волокна, они рыхлые и вырезать из них образец точно под волноводную линию размером сечения 23×10 мм (диапазон 10 ГГц) достаточно сложно. Для волноводных линий, работающих на более высоких частотах, образец практически невозможно вырезать. Кроме того, материал слоев представляет собой гетерогенную структуру, у которой длина радиопоглощающих добавок может быть больше размеров сечения волновода [2–4].

Материалы и методы

В данной статье предложен метод измерения относительной комплексной диэлектрической проницаемости входных слоев градиентных радиопоглощающих структур в диапазоне СВЧ в свободном пространстве на образцах материала, размеры которых превышают размеры излучающей апертуры (400×400 мм). Облучение сравнительно большой поверхности нивелирует погрешности, обусловленные неоднородным распределением наполнителей, за счет усреднения их влияния. Метод также позволяет использовать возможности компьютеризации процесса измерения и предоставляет более широкие возможности для применения современного оборудования, что положительно отразится на развитии радиопоглощающих неметаллических композиционных материалов [5–8].

Как и в известных методах неразрушающего контроля свойств и дефектов материала образца [9–17] с помощью ультразвуковых волн, основанных на априорных знаниях о связи акустических параметров материала исследуемого образца с параметрами прохождения волны через образец, в предложенном методе используются знания о связи комплексного коэффициента прохождения T^* (параметр S_{21} четырехполюсника) плоской электромагнитной волны через плоскопараллельный образец с электродинамическими параметрами материала образца (диэлектрическая и магнитная проницаемости, аналитически связанные с постоянной распространения и волновым сопротивлением). Таким образом, предложенный метод не является методом непосредственной оценки диэлектрических свойств материала и основан на проведении измерений модуля и фазы коэффициента прохождения T^* (параметр S_{21} четырехполюсника) – с последующей математической обработкой полученных результатов измерений – для вычисления комплексной диэлектрической проницаемости материала, как изложено в работе [18].

Для плоского образца немагнитного материала (магнитная проницаемость $\mu^*=1$) толщиной d с относительной комплексной диэлектрической проницаемостью ε^* коэффициенты отражения R^* и прохождения T^* плоской волны в свободном пространстве при нормальном падении теоретически равны соответственно:

$$R^* = R_0^* - R_0^* \cdot e^{-i \cdot 2 \frac{2\pi d \sqrt{\varepsilon^*}}{\lambda}} \cdot \frac{1 - R_0^{*2}}{1 - R_0^{*2} \cdot e^{-i \cdot 2 \frac{2\pi d \sqrt{\varepsilon^*}}{\lambda}}}; \quad (1)$$

$$T^* = \frac{1 - R_0^{*2}}{1 - R_0^{*2} \cdot e^{-i \cdot 2 \frac{2\pi d \sqrt{\varepsilon^*}}{\lambda}}} \cdot e^{-i \cdot \frac{2\pi d \sqrt{\varepsilon^*}}{\lambda}}, \quad (2)$$

где R_0^* – коэффициент отражения на границе раздела сред «свободное пространство–материал образца», равный

$$R_0^* = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon^*}}{1 + \sqrt{\varepsilon^*}}; \quad (3)$$

λ – длина волны в свободном пространстве, см.

Измеренный коэффициент прохождения $T_{\text{изм}}^*$ является относительной величиной и прокалиброван по коэффициенту прохождения $T_{\text{с.п}}^*$ через слой свободного пространства толщиной d

$$T_{\text{с.п}}^* = e^{-i \frac{2\pi d}{\lambda}}; \quad (4)$$

$$T_{\text{изм}}^* = \frac{T^*}{T_{\text{с.п}}^*} = \frac{1 - R_0^{*2}}{1 - R_0^{*2} \cdot e^{-i \frac{2\pi d \sqrt{\varepsilon^*}}{\lambda}}} \cdot e^{-i \frac{2\pi d (\sqrt{\varepsilon^*} - 1)}{\lambda}}. \quad (5)$$

Строго говоря, выражения для коэффициентов прохождения более сложны, чем уравнения (2) и (5), так как указанные формулы не учитывают переотражение между антеннами и измеряемым образцом – $R^* \cdot R_a^*$. Но при установленных ограничениях на величину диэлектрической проницаемости материала входных слоев эти переотражения не внесут ошибку $>2\%$.

Величина $\frac{1 - R_0^{*2}}{1 - R_0^{*2} \cdot e^{-i \frac{2\pi d \sqrt{\varepsilon^*}}{\lambda}}} = 1$, если материал измеряемого образца не имеет потерь, а

его электрическая толщина $\frac{2\pi d \sqrt{\varepsilon^*}}{\lambda}$ кратна π . Но при установленных ограничениях на величину диэлектрической проницаемости измеряемого материала можно с ошибкой не более 2% предположить, что

$$\frac{1 - R_0^{*2}}{1 - R_0^{*2} \cdot e^{-i \frac{2\pi d \sqrt{\varepsilon^*}}{\lambda}}} \approx 1. \quad (6)$$

Комплексная диэлектрическая проницаемость материала при выбранной зависимости комплексных представлений от времени $e^{i\omega t}$ имеет вид $\varepsilon^* = \varepsilon' - i \cdot \varepsilon''$. При этом можно приближенно с максимальной относительной погрешностью не более $\pm 2\%$ считать, что

$$\sqrt{\varepsilon^*} = \sqrt{\varepsilon' - i\varepsilon''} = \sqrt{\varepsilon'} - i \cdot \frac{\varepsilon''}{2\sqrt{\varepsilon'}}. \quad (7)$$

С учетом выражений (5) и (6) получим

$$T_{\text{изм}}^* = |T_{\text{изм}}^*| \cdot e^{i \cdot \Delta\varphi} = e^{-i \cdot \frac{2\pi d \cdot (\sqrt{\varepsilon'} - 1)}{\lambda}}, \quad (8)$$

где $\Delta\varphi$ и $|T_{\text{изм}}^*|$ – измеренные фаза и модуль коэффициента прохождения.

Уравнение (8) с учетом выражения (7) можно записать в виде двух уравнений:

$$\Delta\varphi = -\frac{2\pi d (\sqrt{\varepsilon'} - 1)}{\lambda}, \quad (9)$$

$$|T_{\text{изм}}^*| = e^{-\frac{2\pi d \varepsilon''}{2\lambda \sqrt{\varepsilon'}}} \quad (10)$$

или

$$\Delta\varphi^\circ = -\frac{360 \cdot d (\sqrt{\varepsilon'} - 1)}{\lambda} \text{ [град]}, \quad (11)$$

$$20 \cdot \lg |T_{\text{изм}}^*| = T_{\text{дБ}} = -10 \frac{2\pi d \varepsilon''}{\lambda \cdot \sqrt{\varepsilon'}} \lg e \quad (12)$$

(если модуль и фаза коэффициента прохождения – $T_{\text{дБ}}$ и $\Delta\varphi^\circ$ – измеренные величины соответственно в дБ и градусах).

В результате преобразования уравнений (11) и (12) получаем выражения, определяющие

– ε' – действительную часть комплексной диэлектрической проницаемости материала

$$\varepsilon' = \left(1 - \frac{\Delta\varphi^\circ \cdot \lambda}{360 \cdot d} \right)^2; \quad (13)$$

– ε'' – мнимую составляющую комплексной диэлектрической проницаемости материала

$$\varepsilon'' = \frac{-T_{\text{дБ}} \cdot \lambda \cdot \sqrt{\varepsilon'}}{10 \cdot \lg e \cdot 2\pi d}. \quad (14)$$

Анализ выражений (13) и (14) показывает, что ε' пропорциональна измеренной величине $\Delta\varphi^\circ$, а мнимая часть ε'' – измеренной величине $T_{\text{дБ}}$. Следовательно, относительные отклонения величины компонент диэлектрической проницаемости пропорциональны отклонениям измеренных величин.

На рис. 1 приведена упрощенная схема процесса измерений диэлектрических свойств ПКМ.

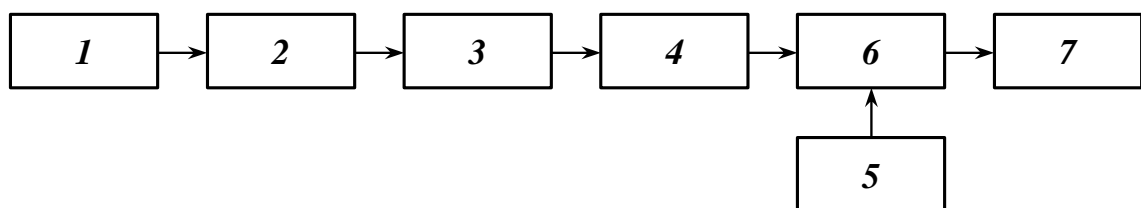


Рисунок 1. Упрощенная схема процесса измерений диэлектрических свойств ПКМ:

1 – подготовка образцов; 2 – установка частоты; 3 – калибровка по свободному пространству; 4 – измерение $T_{дБ}$ и $\Delta\varphi^\circ$ (параметр S_{21} четырехполосника); 5 – программное обеспечение; 6 – расчет выходных параметров; 7 – результаты измерений

Измерение коэффициента прохождения проводится на стенде, функциональная схема которого приведена на рис. 2, состав которого входит анализатор цепей (АЦ) «PNA-L Network Analyzer» фирмы Agilent Technologies с рабочим диапазоном частот от 0,1 до 40,0 ГГц. Для обеспечения работоспособности стенда в заданном диапазоне частот используется набор рупорных антенн П6-23, П6-69 и ЕЛВ-26 с диапазоном частот от 1,0 до 40,0 ГГц. Для перекрытия диапазона частот от 0,1 до 1,0 ГГц можно использовать коаксиальный расширитель с $\varnothing 100$ мм. Измерения проводят в режиме определения параметра S_{21} . В процессе измерений апертуры антенн параллельны друг другу и соосны, расстояние между антеннами составляет от 10 до 50 мм в зависимости от толщины материала образца. Порт №1 анализатора цепей подключен к передающей антенне, порт №2 – к приемной. Перед измерением коэффициента прохождения производят калибровку системы «АЦ–рупорные антенны» при отсутствии образца между антеннами, т. е. по свободному пространству на величину $T^* = 1 + i \cdot 0 = 1 \cdot e^{i \cdot 0}$. Таким образом, измеренное значение T^* при наличии образца материала между антеннами, равно $T_{изм} = T^* \cdot e^{i \cdot \Delta\varphi}$, нормировано относительно коэффициента прохождения через свободное пространство, содержит модуль коэффициента прохождения $T_{изм}$ и аргумент $\Delta\varphi^\circ$, равный разности фаз при прохождении волны между антеннами при наличии измеряемого образца и без него. Для радиопоглощающего материала величина T всегда < 1 и $T_{дБ} = 20 \cdot \lg T$ [дБ] менее 0. В программном обеспечении АЦ выбрана зависимость от времени $e^{+i \cdot \omega \cdot t}$, поэтому фазовое запаздывание при прохождении через образец по отношению к прохождению в свободном пространстве $\Delta\varphi^\circ$ менее 0. Относительное фазовое запаздывание на шкале АЦ изображено в градусах $\Delta\varphi^\circ = \Delta\varphi \cdot 180/\pi$.

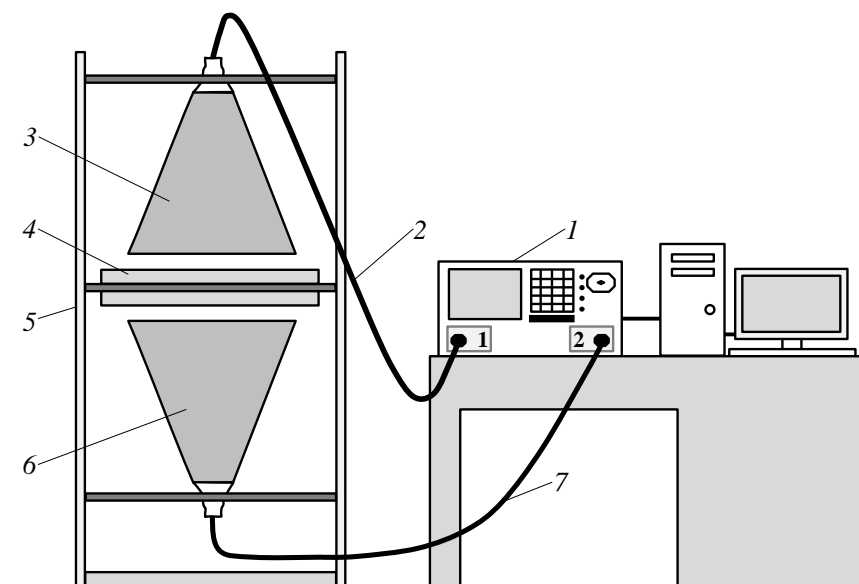


Рисунок 2. Функциональная схема стенда для измерения модуля и фазы коэффициента прохождения и расчета диэлектрических свойств ПКМ:

1 – векторный анализатор цепей «PNA-L Network Analyzer» 5230C фирмы Agilent Technologies; 2 – кабель СВЧ; 3 – передающая антенна; 4 – образец ПКМ; 5 – стойка для установки антенн и перемещения образца; 6 – приемная антенна; 7 – кабель СВЧ

В соответствии с выражениями (11) и (12) по измеренным значениям коэффициента прохождения T^* и фазы $\Delta\varphi^\circ$ рассчитываются ε' и ε'' – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости.

Результаты

Данный метод позволяет проводить оценку диэлектрических свойств материала на образцах с размерами, соизмеримыми с апертурой излучающего устройства, что уменьшает погрешность измерения, вызванную технологическим процессом распределения наполнителя в матрице за счет усреднения по поверхности образца.

Обсуждение и заключения

Следует отметить, что данный метод не заменяет уже существующие, а дополняет их. Метод позволяет проводить оценку диэлектрических свойств слабо наполненных входных слоев образцов многослойных материалов (как правило – градиентных) с усреднением значений в области апертуры антенны, размеры которых в десятки раз превышают размеры образцов в волноводах, а также неразрушающий контроль непосредственно изделий. Однако при этом снижается общая точность проводимых измерений, а также отсутствует возможность исследования распределения наполнителей и связанных с этим процессов.

Данный метод будет востребован разработчиками радиопоглощающих материалов и покрытий в различных отраслях промышленности и связи.

Авторы выражают благодарность за рецензирование статьи к.ф.-м.н. С.В. Кондрашову.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брандт А.А. Исследования диэлектриков на сверхвысоких частотах М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. 1963. С. 191–201.
2. Беляев А.А., Кондрашов С.В., Лепешкин В.В., Романов А.М. Радиопоглощающие материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 348–352.

3. Беляев А.А., Агафонова А.С., Антипова Е.А., Ботаногова Е.Д. Конструкционный радиопоглощающий материал трехслойной структуры с согласующим слоем //Труды ВИАМ. 2013. №7. Ст. 02 (viam-works.ru).
4. Юрков Г.Ю., Краев И.Д., Образцова Е.П. Влияние морфологии магнитного наполнителя на радиопоглощающие характеристики композиционных материалов (в печати).
5. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
6. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
7. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. «Методы испытаний и контроля качества металлических и неметаллических материалов». М.: ВИАМ. 2001. С. 3–8.
8. Ткачук А.И., Гребнева Т.А., Чурсова Л.В., Панина Н.Н. Термопластичные связующие. Настоящее и будущее //Труды ВИАМ. 2013. №11. Ст. 07 (viam-works.ru).
9. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.
10. Мурашов В.В. Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 465–475.
11. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Ч. 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных конструкционных материалов //Контроль. Диагностика. 2007. №5. С. 31, 36, 41, 42.
12. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефектоскопия и диагностика полимерных композиционных материалов акустическими методами /В кн. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 342–347.

13. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф., Иванова Г.А., Файзрахманов Н.Г. Диагностика структуры, состава и свойств полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2008. №1. С. 17–24.
14. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Определение пористости углепластиков лазерно-акустическим способом в авиационных конструкциях /В сб. докл. Международной науч.-технич. конф. «Гидроавиасалон–2008». М.: ЦАГИ. 2008. Ч. 1. С. 287–291.
15. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Диагностика состава и свойств полимерных композитов в деталях и конструкциях //Контроль. Диагностика. 2008. №8. С. 13–17.
16. Сорокин К.В., Мурашов В.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Прогнозирование развития дефектов в конструкциях из ПКМ способом определения изменений жесткости при активировании материала //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 20–22.
17. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала для многоразового космического корабля «Буран» //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 05 (viam-works.ru).
18. Po Chul Kim, Dai Gil Lee. Composite sandwich constructions for absorbing the electromagnetic waves //Composite Structures. 2009. V. 87. P. 161–167.

REFERENCES LIST

1. Brandt A.A. Issledovaniya dijelektrikov na sverhvysokih chastotah [Studies dielectrics at microwave frequencies]. М.: Gos. izd-vo fiz.-mat. lit. 1963. S. 191–201.
2. Beljaev A.A., Kondrashov S.V., Lepeshkin V.V., Romanov A.M. Radiopogloshhajushhie materialy [Radio-absorbing materials] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 348–352.
3. Beljaev A.A., Agafonova A.S., Antipova E.A., Botanogova E.D. Konstrukcionnyj radiopogloshhajushhij material trehslojnoj struktury s soglasujushhim sloem [Structural radar-absorbing material is a three-layer structure with a matching layer] //Trudy VIAM. 2013. №7. Ст. 02 (viam-works.ru).
4. Jurkov G.Ju., Kraev I.D., Obrazcova E.P. Vlijanie morfologii magnitnogo napolnitelja na radiopogloshhajushhie harakteristiki kompozicionnyh materialov [The influence of the filler on the morphology of the magnetic characteristics of radio-composite materials] (v pečati).
5. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technolo-

- gies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
6. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.
 7. Kablov E.N. Kontrol' kachestva materialov – garantija bezopasnosti jekspluatacii aviacionnoj tehniki [Quality control – a guarantee safe operation of aeronautical engineering] /V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Metody ispytanij i kontrolja kachestva metallicheskih i nemetallicheskih materialov». M.: VIAM. 2001. S. 3–8.
 8. Tkachuk A.I., Grebneva T.A., Chursova L.V., Panina N.N. Termoplastichnye svjazujushhie. Nastojashhee i budushhee [Thermoplastic binders. Present and Future] //Trudy VIAM. 2013. №11. St. 07 (viam-works.ru).
 9. Kablov E.N., Sivakov D.V., Guljaev I.N., Sorokin K.V., Fedotov M.Ju., Goncharov V.A. Metody issledovanija konstrukcionnyh kompozicionnyh materialov s integrirovannoj jelektromehaničeskoj sistemoj [Methods for studying structural composite materials with an integrated electromechanical system] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №4. S. 17–20.
 10. Murashov V.V. Opredelenie fiziko-mehaničeskih harakteristik i sostava polimernyh kompozicionnyh materialov akustičeskimi metodami [Determination of physical and mechanical properties and composition of the polymer composite materials by acoustic methods] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 465–475.
 11. Murashov V.V., Rumjancev A.F. Defekty monolitnyh detalej i mnogoslojnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov i metody ih vyjavlenija. Ch. 2. Metody vyjavlenija defektov monolitnyh detalej i mnogoslojnyh konstrukcij iz polimernyh konstrukcionnyh materialov [Defects monolithic parts and multilayer structures of polymer composite materials and methods for their detection. Part 2 Methods for detection of defects monolithic parts and multilayer structures made of polymeric structural materials] //Kontrol'. Diagnostika. 2007. №5. S. 31, 36, 41, 42.
 12. Murashov V.V., Rumjancev A.F. Defektoskopija i diagnostika polimernyh kompozicionnyh materialov akustičeskimi metodami [Flaw detection and diagnosis of polymer composite materials by acoustic methods] /V kn. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnič. sb. M.: VIAM. 2007. S. 342–347.
 13. Murashov V.V., Rumjancev A.F., Ivanova G.A., Fajzrahmanov N.G. Diagnostika struktury, sostava i svojstv polimernyh kompozicionnyh materialov [Diagnosis of the

- structure, composition and properties of polymer composites] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2008. №1. S. 17–24.
14. Murashov V.V., Rumjancev A.F. Opredelenie poristosti ugleplastikov lazerno-akusticheskim sposobom v aviacionnyh konstrukcijah [Porosity of carbon plastics laser-acoustic method to aerostructures] /V sb. dokl. Mezhdunarodnoj nauch.-tehnic. konf. «Gidroaviasalon–2008». M.: CAGI. 2008. Ch. 1. S. 287–291.
 15. Murashov V.V., Rumjancev A.F. Diagnostika sostava i svojstv polimernyh kompozitov v detaljah i konstrukcijah [Diagnosis of the composition and properties of polymer composites in the details and constructions] //Kontrol'. Diagnostika. 2008. №8. S. 13–17.
 16. Sorokin K.V., Murashov V.V., Fedotov M.Ju., Goncharov V.A. Prognozirovanie razvitija defektov v konstrukcijah iz PKM sposobom opredelenija izmenenij zhestkosti pri aktjuirovanii materiala [Prediction of the development of defects in the construction of the PCM method for determining changes in the stiffness of the material at aktyuirovanii] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 20–22.
 17. Murashov V.V. Nerazrushajushhij kontrol' zagotovok i detalej iz uglerod-uglerodnogo kompozicionnogo materiala dlja mnogorazovogo kosmicheskogo korablja «Buran» [Nondestructive testing of pieces and parts of a carbon-carbon composite material for space shuttle «Buran»] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 05 (viam-works.ru).
 18. Po Chul Kim, Dai Gil Lee. Composite sandwich constructions for absorbing the electromagnetic waves //Composite Structures. 2009. V. 87. P. 161–167.