

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-5-33-39>

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕСТРУКТИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАГРЕВЕ

© **Виталий Петрович Крылов***, **Роман Александрович Чирков**,
Александр Евгеньевич Жителев, **Максим Олегович Забейжайлов**

ОНПП «Технология» имени А. Г. Ромашина, Россия, 249031, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское ш., д. 15;

*e-mail: info@technologiya.ru

*Статья поступила 12 сентября 2023 г. Поступила после доработки 19 сентября 2023 г.
Принята к публикации 19 февраля 2024 г.*

Диэлектрические свойства материалов при нагреве на сверхвысоких частотах определяют методами, основанными на применении волноводных объемных резонаторов. Однако поскольку при измерении образец находится в закрытом объеме, при определении диэлектрических свойств деструктирующих материалов возникают погрешности, связанные с заполнением объема резонатора и осаждением на его внутренних проводящих поверхностях продуктов разложения образца материала. В работе представлены результаты исследования диэлектрических свойств деструктирующих материалов при нагреве с помощью объемного волноводного резонатора методами, исключающими влияние продуктов деструкции на точность измерений. Для снижения влияния деструктирующих паров, поднимающихся с поверхности образца в процессе деструкции, применяли дополнительные тонкие кварцевые пластины, укладываемые на поверхности образца. Помимо пластин, использовали также кюветы с крышкой, исключающей попадание продуктов деструкции в объем резонатора. Приведена методика учета влияния пластин и кюветы в расчете диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образца материала при нагреве в объемном резонаторе. Исследованы изменения диэлектрических свойств композиционного материала, состоящего из кварцевой ткани, пропитанной алюмохромофосфатным связующим, и стеклотекстолита из кварцевой ткани, пропитанной фенолформальдегидным связующим, в области температур выше начала деструкции (вплоть до температур, при которых наблюдается потеря конструкционной прочности материалов). Разработанная методика может быть использована при проведении исследований теплофизических свойств деструктирующих материалов для оценки изменения их диэлектрических характеристик в эксплуатационных условиях высокотемпературного нагрева.

Ключевые слова: деструктирующие материалы; объемные волноводные резонаторы; диэлектрические свойства композиционных материалов при нагреве.

STUDY OF THE DIELECTRIC PROPERTIES OF DECOMPOSING MATERIALS DURING HEATING

© **Vitalii P. Krylov***, **Roman A. Chirkov**, **Alexandr E. Zhitelev**, **Maksim O. Zabezhailov**

A. G. Romashin ONPP "Technology", 15, Kievskoe sh., Obninsk, Kaluga obl., 249031, Russia; *e-mail: info@technologiya.ru

Received September 12, 2023. Revised September 19, 2023. Accepted February 19, 2024.

The dielectric properties of materials when heated at ultrahigh frequencies are determined by methods based on the use of waveguide cavity resonators. However, as the sample is in the closed volume during measurements, the dielectric properties of destructive material thus determined can contain errors attributed filling of the resonator volume and depositing products of the sample decomposition on the internal conducting surfaces of the resonator. We present the results of studying the dielectric properties of destructive materials under heating in waveguide resonator cavity using methods that exclude the impact of destruction products on the accuracy of measurement. To reduce the influence of destructive vapors rising from the surface of the sample during the destruction process, additional thin quartz plates, placed on the sample surface were used. In addition, cuvettes with a lid were also used to prevent destruction products from entering the resonator volume. A method for taking into account the effect of plates and cuvettes in calculating the dielectric constant and dielectric loss tangent of a material sample when heated in a cavity resonator is presented. Changes in the dielectric properties of a composite material consisting of quartz fabric impregnated with an aluminochromophosphate binder and fiberglass laminate made of quartz fabric impregnated with a phenol-formaldehyde binder were studied in a temperature range above the onset of the destruction (up to temperatures at which loss of the structural strength of the material is observed). The developed method can be used in studying the thermophysical properties of destructive materials to assess changes in their dielectric characteristics under operation conditions of high-temperature heating.

Keywords: destructive materials; waveguide cavity resonator; dielectric properties of composite materials under heating.

Введение

На сверхвысоких частотах диэлектрическую проницаемость (ϵ) и тангенс угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$) материалов определяют резонансными методами, основанными на применении объемных волноводных резонаторов, которые используют также при измерении температурных зависимостей $\epsilon(T)$ и $\operatorname{tg} \delta(T)$ [1 – 12].

Диэлектрические свойства деструктурирующих материалов в зависимости от температуры можно исследовать с помощью ступенчатого нагрева, который заключается в нагреве образца в печи сопротивления до определенной температуры с измерением его диэлектрических характеристик до и после нагрева [13]. При этом строится модель деградации свойств материала при помощи двумерной интерполяции полученных экспериментальных данных. Отметим, что поскольку диэлектрические свойства большинства материалов зависят от температуры прогрева, прямые измерения для определения диэлектрических свойств деструктурирующих материалов могут позволить получить более точные данные.

Применение волноводных и резонаторных устройств с замкнутыми полостями для прямых измерений диэлектрических свойств деструктурирующих материалов при нагреве связано с тем, что на их проводящих поверхностях осаждаются выделяющиеся продукты деструкции. Это снижает проводимость и точность измерений. Процесс деструкции можно замедлить, увеличив скорость нагрева, но это приводит к неравномерно-

сти прогрева образца по толщине, что также уменьшает точность определений [14].

Цель работы — исследование диэлектрических свойств деструктурирующих материалов при нагреве с помощью объемного волноводного резонатора методами, исключающими влияние продуктов деструкции на точность измерений.

Материалы, методика, оборудование

Определение характеристик деструктурирующего материала при нагреве в полном цилиндрическом резонаторе позволяет учесть влияние теплофизических процессов термодеструкции, протекающих в материале, на его диэлектрические свойства. При высокотемпературных измерениях диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь деструктурирующего материала выброс продуктов разложения материала происходит с поверхности нагретого образца, поэтому закрытие поверхности приведет к резкому снижению выбросов в полость резонатора и, как следствие, повышению точности измерений.

Проводили измерения в резонаторе многослойного образца, в котором деструктурирующий материал накрывался радиопрозрачным слоем из беспористого материала, препятствующего проникновению продуктов горения в полость резонатора. В качестве радиопрозрачного слоя использовали тонкий, по сравнению с длиной волны в волноводе, образец из кварцевого стекла, температурная зависимость диэлектрической проницаемости которого хорошо изучена [3]. Для исключения влияния продуктов горения на электропроводящие свойства поверхности поршня, для его защиты также использовали кварцевое стекло, расположенное ниже образца из деструктурирующего материала.

При измерениях испытуемый образец помещали в полость 4 измерительного объемного резонатора с подвижным поршнем 5 (рис. 1). В электродинамической модели эксперимента трехслойный образец включал деструктурирующий материал 1 толщиной d_2 , верхний 2 и нижний 3 защитные радиопрозрачные слои (толщины d_3 и d_1 соответственно).

Решая для представленной конфигурации устройства с образцом электродинамическую задачу с учетом граничных условий для тангенциальных составляющих поля в резонаторе, определяли температурную зависимость диэлектрической проницаемости деструктурирующего материала [15]:

$$\epsilon_2(T) = \frac{\beta_2^2(T)\lambda_0^2}{2\pi} + \frac{\lambda_0^2}{\lambda_{кр}^2}, \quad (1)$$

где $\lambda_0 = c/f$ — длина волны в свободном пространстве (c — скорость света; f — резонансная

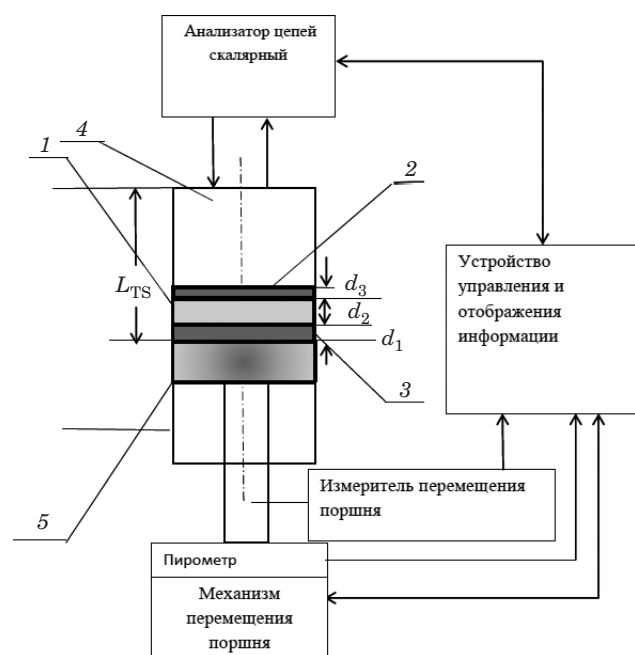


Рис. 1. Схема измерения образца деструктурирующего материала в объемном резонаторе

Fig. 1. Measurement scheme for a sample of destructive materials in a cavity resonator

частота); $\lambda_{кр} = \alpha R$ — критическая длина волны типа H_{01} в резонаторе (R — радиус резонатора; $\alpha = 2\pi/\nu_{01} = 1,639$ [$\nu_{01} = 3,832$ — численное значение корня уравнения для функции Бесселя $J_0(\nu_{01}) = 0$ при рассмотрении распространения волны H_{01} в цилиндрическом резонаторе]); $\beta_2 = 2\pi/\lambda_2$ — постоянная распространения волны H_{01} в области расположения образца из деструктирующего материала, которая определяется из решения трансцендентного уравнения, заданного в неявной форме:

$$\frac{\beta_1 \operatorname{tg}(\beta_2 d_2) + \beta_2 \operatorname{tg}(\beta_1 d_1)}{\beta_1 (\beta_1 - \beta_2 \operatorname{tg}(\beta_2 d_2) \operatorname{tg}(\beta_1 d_1))} = \frac{\beta_3 \operatorname{tg}(\beta_4 d_4) + \beta_4 \operatorname{tg}(\beta_3 d_3)}{\beta_3 (\beta_3 \operatorname{tg}(\beta_3 d_3) \operatorname{tg}(\beta_4 d_4) - \beta_4)}, \quad (2)$$

где $\beta_1 = 2\pi/\lambda_1$ — постоянная распространения волны H_{01} в области расположения нижнего слоя

$$(\lambda_1 = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_1 - \lambda_0^2 / \lambda_{кр}^2} —$$

длина волны в месте расположения нижнего слоя с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1 = 3,81$;

$$\lambda_2 = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_2 - \lambda_0^2 / \lambda_{кр}^2} —$$

длина волны в области расположения образца из деструктирующего материала с диэлектрической проницаемостью ε_2); $\beta_3 = 2\pi/\lambda_3$ — постоянная распространения волны H_{01} в области расположения верхнего слоя

$$(\lambda_3 = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_3 - \lambda_0^2 / \lambda_{кр}^2} —$$

длина волны в области расположения верхнего слоя с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_3 = 3,81$); $d_4(T) = L_T(T) - L_{TS}(T)$ — длина незаполненной части резонатора при температуре измерения ($L_{TS}(T)$, $L_T(T)$ — длины резонатора с образцом и без при температуре измерения); $\beta_4 = 2\pi/\lambda_4$ — постоянная распространения волны H_{01} в незаполненной части резонатора

$$(\lambda_4 = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_4 - \lambda_0^2 / \lambda_{кр}^2} —$$

длина волны в незаполненной части резонатора с диэлектрической проницаемостью воздуха $\varepsilon_4 = 1$).

Для определения температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь образца измеряли коэффициент передачи резонатора с образцом и без, а затем рассчитывали тангенс угла диэлектрических потерь деструктирующего материала по формуле [15]

$$\operatorname{tg} \delta_2(T) = \left(\operatorname{tg} \delta(T) - \frac{d_3}{d_2(T) + d_1 + d_3} \operatorname{tg} \delta_3 - \right.$$

$$\left. - \frac{d_1}{d_2(T) + d_1 + d_3} \operatorname{tg} \delta_1 \right) \frac{d_2(T) + d_3 + d_1}{d_2(T)}, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg} \delta_1 = \operatorname{tg} \delta_3 = 0,00005$ — тангенсы угла диэлектрических потерь верхнего и нижнего слоев; $\operatorname{tg} \delta(T)$ — измеренная температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь многослойного образца; $d_2(T)$ — толщина образца из деструктирующего материала при температуре измерения.

Так как при нагреве вследствие изменения теплофизического состояния деструктирующего материала меняются его геометрические размеры, в расчетном алгоритме использовали априорные теплофизические измерения толщины деструктирующего материала в виде температурной зависимости $d_2(T)$.

При нагреве и соответствующем ему расширении материалов, из которых изготовлен резонатор, геометрия его полости также меняется, поэтому в алгоритме расчета изменение электрической длины резонатора учитывали в виде априорной зависимости $L_T(T)$. Предварительно зависимость $L_T(T)$ определяли для пустого резонатора (без образца).

Заметим, что вносимые продуктами деструкции изменения проводящих свойств поверхности стенок резонатора влияют на величину затухания в резонаторе и неопределенность измерения тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне температур от начала деструкции до температуры, при которой наблюдается потеря конструкционной прочности материала.

Для измерения характеристик резонатора использовали анализатор цепей. Подвижный поршень перемещали с помощью механизма, положение которого контролировали измерителем перемещения поршня до установления резонансной длины на резонансной частоте. Устройство управления и отображения информации управлялось нагревом резонатора с помощью контроля пирометром температуры на поверхности поршня.

Обсуждение результатов

Исследовали деструктирующие материалы композиционного состава, состоящие из кварцевой ткани, пропитанной алюмохромофосфатным связующим (ХАФС), и стеклотекстолита из кварцевой ткани с фенолформальдегидным связующим (СК_{кв} ФН) [16, 17]. Измерения проводили в полом цилиндрическом резонаторе (диаметр — 50 мм) с волной H_{01} на фиксированной резонансной частоте $f = 9,45$ ГГц. Настройку резонатора в резонанс осуществляли изменением резонансной длины с помощью подвижного поршня.

Для оценки влияния продуктов горения деструктирующего материала на точность опре-

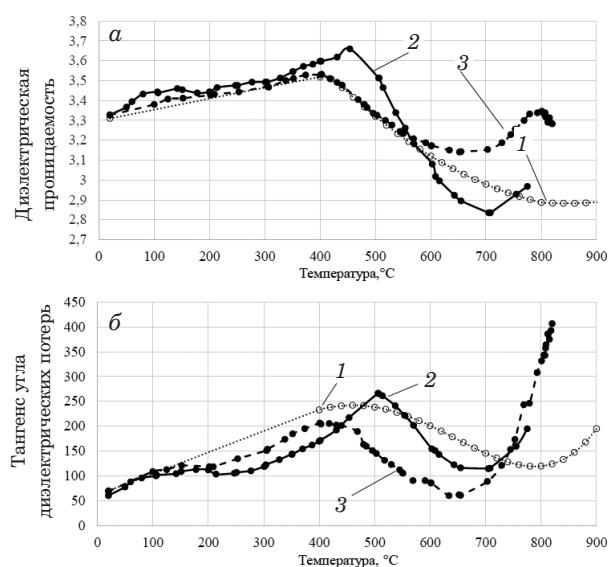


Рис. 2. Температурные зависимости ϵ (а) и $\tan \delta$ (б) деструктирующего композиционного материала ХАФС: 1 — метод ступенчатого нагрева; 2, 3 — резонаторный метод с применением одной кварцевой пластины и кюветы с крышкой

Fig. 2. Temperature dependences of ϵ (a) and $\tan \delta$ (b) of the destructive composite consisting of the quartz fabric with AlPO_4 binder: 1 — stage heating; 2, 3 — resonator method using a single quartz plate and a cuvette with a lid

делений диэлектрических свойств при нагреве использовали: 1) укрытие образца деструктирующего материала только верхним слоем из кварцевого стекла; 2) укрытие образца верхним и нижним слоями из кварцевого стекла; 3) специальную кювету с крышкой, которая закрывала образец со всех сторон, включая торцевые стороны.

Результаты определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь композиционного материала ХАФС при нагреве представлены на рис. 2. Кривая 1 получена с помощью ступенчатого нагрева [13] с учетом температурной зависимости диэлектрических свойств материала, измеренных экспериментально до начала деструкции.

Видно, что температурные зависимости диэлектрических характеристик как для прямых экспериментальных измерений (кривые 2, 3), так и для расчетно-экспериментальных результатов, полученных с использованием метода ступенчатого нагрева (кривая 1), схожи. При нагреве до начала деструкции наблюдается рост диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Выше температуры начала деструкции (400 °С) диэлектрические характеристики снижаются, что связано с дегидратацией алюмохромофосфатного связующего [18]. Также при температурах выше 400 °С может происходить разложение сохранившейся при термообработке при изготовлении материала органической

компоненты — аппрета, используемого для повышения адгезии связующего и кварцевой ткани. Далее, при нагреве выше 700 °С, начинается рост величин диэлектрических характеристик, который можно связать с образованием новых кристаллических фаз [18].

Композиционный многокомпонентный материал — смесь гетерогенных сред [19]. Кроме того, температурная зависимость диэлектрической проницаемости кварцевого стекла, составляющего его тканую основу, не меняется в представленном температурном диапазоне [3]. Учитывая это, рост диэлектрической проницаемости измеряемого материала при нагреве до 450 °С можно связать с увеличением диэлектрической проницаемости алюмохромофосфатного связующего с ростом температуры. Дальнейшее падение объясняется повышением пористости материала за счет дегидратации связующего и выгоранием органической составляющей материала (аппрета). При температурах выше 700 °С резкий рост тангенса угла диэлектрических потерь можно связать с кристаллизацией связующего и накоплением продуктов распада органических компонентов в материале.

При схожести вида экспериментально полученных температурных зависимостей диэлектрических характеристик наблюдается разброс результатов по абсолютной величине (см. рис. 2). Для диэлектрической проницаемости разброс до начала деструкции не превышал 1,7 % при расширенной неопределенности метода 0,5 % (для образцов с высокой шероховатостью, имеющей место в случае композиционных материалов, величина неопределенности измерений увеличивается). Это свидетельствует о минимальном влиянии методической погрешности на результаты измерений, которое могло иметь место при использовании дополнительных приспособлений (кварцевых пластинок и кварцевой кюветы) в измерительной ячейке.

При температуре выше начала деструкции разброс экспериментально определенных величин составляет 6 – 12 %. Такой разброс можно связать с различными условиями протекания процесса деструкции материала (дегидратацией и разложением органических компонентов) в зависимости от используемого метода (с кварцевой пластиной или с кюветой).

Расчетно-экспериментальная зависимость, полученная методом ступенчатого нагрева и скорректированная на рост диэлектрической проницаемости материала до начала деструкции, хорошо соотносится с экспериментальными данными до температуры 700 °С. При более высоких температурах, начиная с 800 °С, наблюдается медленный рост в отличие от экспериментальных кривых, у которых диэлектрическая прони-

цаемость быстро повышается при температуре выше 700 °С.

Для тангенса угла диэлектрических потерь отличие между экспериментальными данными, полученными резонаторным методом при температурах до начала деструкции (до 400 °С), не превышало 11 (ниже 150 °С) и 30 % (выше 400 °С) при расширенной неопределенности измерений ~10 %. При этом выше 150 °С рост $\tan \delta$ замедляется, и на кривой 2 наблюдается некоторое падение, что может быть связано с процессом выхода влаги из образцов, имеющих высокую открытую пористость и гигроскопичность. Кривая для образца, измерявшегося в кювете (кривая 3), демонстрирует меньшие изменения, что, вероятно, связано с худшими условиями по выходу влаги, чем в случае образца с одной пластиной. Этим можно объяснить отличия в значениях $\tan \delta$ в экспериментально измеренных образцах резонаторным методом до начала деструкции, превышающие величину расширенной неопределенности метода.

При температуре выше начала деструкции и до 700 °С разброс величин $\tan \delta$ составил 30 – 90 %, что существенно превышает расширенную неопределенность метода и может быть объяснено разными внешними условиями протекания деструкции связующего (различные условия для выхода газообразных продуктов при дегидратации и разложении) в случае использования кварцевой пластины и кюветы с крышкой.

Полученная методом ступенчатого нагрева и скорректированная на рост тангенса угла диэлектрических потерь материала расчетно-экспериментальная кривая показывает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными. Однако, как и в случае диэлектрической проницаемости, зависимость несколько сдвинута в область высоких температур и демонстрирует более плавное падение после начала деструкции и плавный рост при температурах выше 700 °С, что можно связать с особенностями метода ступенчатого нагрева, имеющего большой шаг при температурных измерениях (50 – 100 °С). Отметим, что большой шаг по температуре может давать наблюдаемый эффект сглаживания температурных зависимостей диэлектрических характеристик.

Результаты определения ε и $\tan \delta$ образца стеклотекстолита СК_{кв} ФН (толщина $d_2 = 9$ мм) при нагреве до 630 °С со скоростью 20 °/мин представлены на рис. 3.

Видно, что для диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материала СК_{кв} ФН зависимости, полученные резонаторным методом с использованием двух пластин и кюветы с крышкой, схожи. Разброс экспериментально измеренных величин до начала деструкции (300 °С) не превышает 1 (для ε) и 17 %

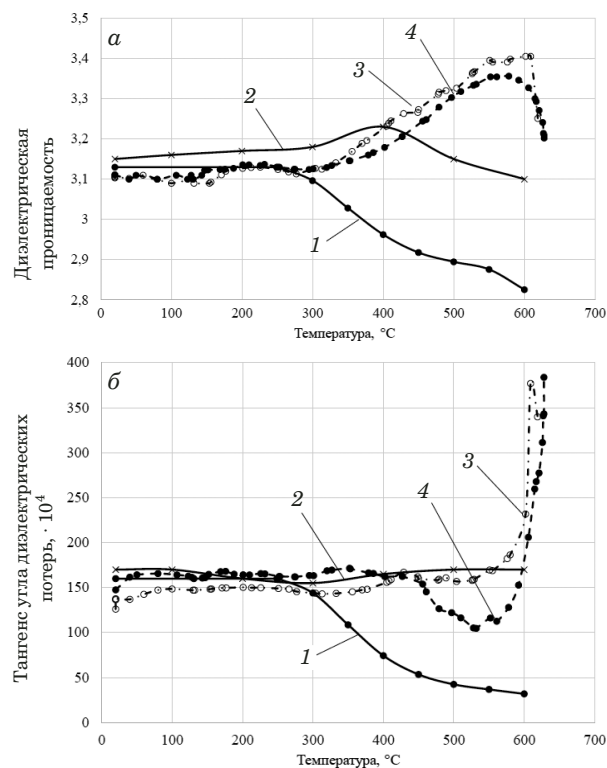


Рис. 3. Температурные зависимости ε (а) и $\tan \delta$ (б) СК_{кв} ФН: 1 — метод ступенчатого нагрева [13]; 2 — волноводный метод [20, 21]; 3, 4 — резонаторный метод с применением двух кварцевых пластин и кюветы с крышкой

Fig. 3. Temperature dependences of ε (a) and $\tan \delta$ (b) of the fiberglass with phenol-formaldehyde binder: 1 — stage heating [13]; 2 — waveguide method [20, 21]; 3, 4 — resonator method with two quartz plates and a cuvette with a lid

(для $\tan \delta$), что сравнимо с расширенной неопределенностью метода (с учетом повышенной шероховатости образцов). При температуре выше начала деструкции разброс для ε составляет ~1 – 2 % и по-прежнему сравним с расширенной неопределенностью метода, а для $\tan \delta$ он увеличивается до 53 %, что превышает расширенную неопределенность метода, и может быть объяснен различными условиями протекания деструкции связующего при использовании двух кварцевых пластин и кюветы с крышкой.

Результаты измерения диэлектрических характеристик, полученные резонаторным (кривые 3, 4) и волноводным (кривая 2) методами до начала процесса деструкции, показывают высокую сходимость (~1 – 2 % для ε и ~10 – 15 % для $\tan \delta$). Выше 300 °С в поведении кривых наблюдается отличие. В случае резонаторного метода наблюдается увеличение скорости роста диэлектрической проницаемости, вероятно, связанное с процессами разложения связующего внутри материала, а выше 600 °С — ее падение, которое можно объяснить выгоранием органического связующего из материала. При этом на кривых для $\tan \delta$, полученных резонаторным методом при тем-

пературах выше 600 °С, фиксируется резкий рост, который, по-видимому, обусловлен накоплением в материале или на стенках кварцевых стекол и кюветы углеродсодержащих продуктов распада связующего.

В случае измерений в волноводе (кривая 2) после начала деструкции характерен сначала некоторый рост ϵ , также, по-видимому, связанный с процессами разложения связующего внутри материала, а затем спад, обусловленный выгоранием органического связующего. Однако эти фазы несколько сдвинуты по температуре относительно измерений резонаторным методом. Кроме того, в измерениях волноводным методом резкий рост $\operatorname{tg} \delta$ при температурах выше начала деструкции отсутствует. Данные различия, возможно, связаны с различными режимами нагрева и/или разными внешними условиями протекания деструкции связующего при резонаторном и волноводном методах. В частности, при волноводном методе (в отличие от резонаторного с использованием кварцевых пластин и кюветы, закрывающих образец) газообразные продукты деструкции не задерживаются в материале, а свободно выносятся за его пределы в объем волновода.

Влияние режима нагрева и условий выхода продуктов деструкции связующего из материала на рост диэлектрических характеристик, измеряемых *in situ* резонаторным методом, подтверждают данные, полученные *ex situ* методом ступенчатого нагрева (см. рис. 3, кривая 1). В случае ступенчатого нагрева образцы нагреваются в камере печи объемом, существенно превышающим объем образца. При этом перед измерениями в резонаторе образцы инерционно остывают после выгрузки из печи длительное время, за которое продукты разложения успевают улетучиться из образца в более холодное окружающее пространство. В связи с этим при нагреве наблюдается снижение величин диэлектрических характеристик материала в процессе разложения связующего.

Сравнивая температурные кривые диэлектрических характеристик для материалов на основе алюмохромофосфатного и фенолформальдегидного связующего, полученные разными методами (см. рис. 2, 3), можно заключить, что при температурах выше начала деструкции (в зависимости от внешних условий, при которых происходит нагрев и измерение деструктирующего материала) отличия в значениях могут достигать 20 (для ϵ) и 600 % (для $\operatorname{tg} \delta$). Ключевую роль для процесса деструкции играют внешние условия: режим нагрева, а также свобода выхода продуктов деструкции из материала при нагреве.

Заключение

Таким образом, применяемые методы, ограничивающие выброс продуктов деструкции с поверхностей измеряемого образца, позволили исследовать температурные зависимости диэлектрических свойств композиционных материалов радиотехнического назначения. Разработаны электродинамические модели расчета диэлектрических свойств на основе измерения многослойного образца в объемном волноводном резонаторе. В температурном диапазоне выше начала деструкции и до потери конструкционной прочности получены температурные зависимости $\epsilon(T)$ и $\operatorname{tg} \delta(T)$ для материалов из стеклотекстолита с кварцевой тканью и фенолформальдегидным связующим и композиционного состава, состоящего из кварцевой ткани, пропитанной алюмохромофосфатным связующим. Показано, что в зависимости от условий нагрева и измерения деструктирующих материалов экспериментальные данные могут иметь разбросы значений до 20 (для диэлектрической проницаемости) и 600 % (для тангенса угла диэлектрических потерь). Поэтому необходимо использовать тот метод измерения, который наиболее близок по режиму нагрева и внешним условиям протекания процесса деструкции к условиям эксплуатации материала.

Финансирование

Работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации). Дополнительные гранты на проведение или руководство данным исследованием не привлекались.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Егоров В. Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ / Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 5 – 38.
- Литовченко А. В., Игнатенко Г. К. Некоторые аспекты метрологического обеспечения измерения диэлектрических свойств материалов на сверхвысокой частоте в интервале температур 20 – 1200 °С / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 8. С. 66 – 69.
- Крылов В. П. Измерение диэлектрических свойств диоксида кремния на частоте 10 ГГц при нагреве до 1200 °С в цилиндрическом волноводном резонаторе / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 9. С. 47 – 49.
- Крылов В. П. Учет погрешностей определения диэлектрической проницаемости методом волноводного резонатора / Метрология. 1994. № 5. С. 33 – 36.
- Егоров В. Н., Кащенко М. В., Онхонов Р. Р. Точность диэлектрических измерений в объемном цилиндрическом H_{01p} резонаторе / Измерительная техника. 2003. № 10. С. 41 – 45.
- Литовченко А. В. Особенности методики обработки результатов точных измерений ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ на СВЧ при нагреве образца / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. Т. 70. № 4. С. 31 – 36.

7. Литовченко А. В. Высокоточный СВЧ-измеритель ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ нагреваемых образцов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. Т. 68. № 10. С. 35 – 38.
8. Литовченко А. В., Игнатенко Г. К. Влияние остаточного электрического зазора между образцом и поршнем резонатора при измерении диэлектрических характеристик материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 11. С. 36 – 40.
9. Певнева Н. А., Гурский А. Л., Кострикин А. М. Метод свободного пространства с использованием векторного анализатора цепей для определения диэлектрической проницаемости материалов на сверхвысоких частотах / Доклады БГУИР. 2019. № 4. С. 32 – 39.
10. Дьяконова О. А., Казанцев Ю. Н., Каленов Д. С. Измерительный комплекс для определения электромагнитных характеристик материалов резонансным методом с помощью скалярных анализаторов цепей / Журнал радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 1 – 7.
11. Фомин Д. Г., Дударев Н. В., Даровских С. Н. Анализ методов измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне длин волн / Журнал радиоэлектроники. 2021. № 6. С. 1 – 12. DOI: 10.30898/1684-1719.20216.6
12. Li E., Nie Z., Guo G., Zahng Q. Broadband measurements of dielectric properties of low-loss materials at high temperatures using circular cavity method / Progress in Electromagnetics Research, PIER 92. 2009. P. 103 – 120.
13. Жителев А. Е., Чирков Р. А., Миронов Р. А., Забейжайлов М. О. Исследование свойств разрушающихся материалов при ступенчатом нагреве / XVI международный семинар «Структурные основы модифицированных материалов»: тезисы докладов. — Обнинск, 2021. С. 61 – 64.
14. Баринов Д. Я., Остепеникова О. Г., Мараховский П. С., Зуев Ф. В. Изучение динамики прогрева разрушающегося теплозащитного материала методом математического моделирования температурных полей / Труды ВИАМ. 2019. № 8(80). С. 109 – 118. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-109-118
15. Зальцман Е. Б. Измерение параметров магнитодиэлектриков и немагнитных ферритов при помощи прямоугольного резонатора на волну H_{10} / Радиотехника. 1958. Т. 13. № 10. С. 76 – 80.
16. Yiguang Wang, Jinling Liu. Aluminum Phosphate-Mullite Composites for High-Temperature Radome Applications / Int. J. Appl. Ceram. Technol. 2009. N 6. P. 190 – 194. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2008.02324
17. Johnston P., Doyle E., Orzel R. Phenolics: A Literature Review of Thermal Decomposition Products and Toxicity / Journal of the American College of Toxicology. 1998. Vol. 7. N 2. P. 23 – 35.
18. Chen N., Gao S., Huo J., et al. Studies on high-temperature thermal transformation and dielectric property of aluminum-chromium phosphates / Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2014. Vol. 116. N 2. P. 875 – 879.
19. Крылов В. П. Моделирование электромагнитных свойств многокомпонентного материала / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 7. С. 38 – 41. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-38-41
20. Бойков А. К., Павлов В. В., Пономарев В. П. и др. Определение характеристик стеклотекстолитов при высоких температурах / В кн.: Материалы антенных обтекателей. — М.: ОНТИ ВИАМ, 1964.
21. Павлов В. В., Семенова Г. П. Зависимость диэлектрической проницаемости стеклотекстолита от его компонентов / В кн.: Материалы антенных обтекателей. — М.: ОНТИ ВИАМ, 1964.
3. Krylov V. P. Measurement of dielectric properties of dioxide of silicon at a frequency of 10 GHz when heating to 1200°C in the cylindrical waveguide resonator / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2007. Vol. 73. N 9. P. 47 – 49 [in Russian].
4. Krylov V. P. Accounting of errors of definition of dielectric permeability by method of the waveguide resonator / Metrologiya. 1994. N 5. P. 33 – 36 [in Russian].
5. Egorov V. N., Kashchenko M. V., Onkhonov R. R. Accuracy of dielectric measurements in volume cylindrical H_{01r} -resonator / Izmerit. Tekhn. 2003. N 10. P. 41 – 45 [in Russian].
6. Litovchenko A. V. Features of a technique of processing of results of exact measurements ϵ and $\operatorname{tg} \delta$ on the microwave oven when heating a sample / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2004. Vol. 70. N 4. P. 31 – 36 [in Russian].
7. Litovchenko A. V. The high-precision microwave measuring instrument ϵ and $\operatorname{tg} \delta$ of the heated samples / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2002. Vol. 68. N 10. P. 35 – 38 [in Russian].
8. Litovchenko A. V., Ignatenko G. K. Influence of a residual electric gap between a sample and the piston of the resonator at measurement of dielectric characteristics of materials / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2012. Vol. 78. N 11. P. 36 – 40 [in Russian].
9. Pevneva N. A., Gursky A. L., Kostrikin A. M. Method of free space with use of the vector analyzer of chains for definition of dielectric permeability of materials at ultrahigh frequencies / Dokl. BGUIR. 2019. N 4. P. 32 – 39 [in Russian].
10. Dyakonova O. A., Kazantsev Yu. N., Kalenov D. S. A measuring complex for definition of electromagnetic characteristics of materials by a resonant method by means of scalar analyzers of chains / Zh. Radioélekt. 2017. N 7. P. 1 – 7 [in Russian].
11. Fomin D. G., Dudarev N. V., Darovsky S. N. The analysis of methods of measurement of dielectric properties of materials in the microwave oven the spectrum of lengths of waves / Zh. Radioélekt. 2021. N 6. P. 1 – 12 [in Russian]. DOI: 10.30898/1684-1719.20216.6
12. Li E., Nie Z., Guo G., Zahng Q. Broadband measurements of dielectric properties of low-loss materials at high temperatures using circular cavity method / Progress in Electromagnetics Research, PIER 92. 2009. P. 103 – 120.
13. Zhitelev A. E., Chirkov R. A., Mironov R. A., Zabezhaylov M. O. Research of properties of decomposing materials at step-by-step heating / XVI international seminar “Structural bases of the modified materials MNT-XVI”: theses of reports. — Obninsk, 2021. P. 61 – 64 [in Russian].
14. Barinov D. Ya., Ostepennikov O. G., Marakhovsky P. S., Zuev F. V. Studying of heating dynamics of decomposing heat protective material by the method of mathematical modeling of temperature fields / Tr. VIAM. 2019. N 8. P. 109 – 118 [in Russian]. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-109-118
15. Zaltsman E. B. Measurement of parameters of magnetodielectrics and not magnetized ferrite by means of the rectangular resonator on H_{10} wave / Radiotekhnika. 1958. Vol. 13. N 10. P. 76 – 80 [in Russian].
16. Yiguang Wang, Jinling Liu. Aluminum Phosphate-Mullite Composites for High-Temperature Radome Applications / Int. J. Appl. Ceram. Technol. 2009. N 6. P. 190 – 194. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2008.02324
17. Johnston P., Doyle E., Orzel R. Phenolics: A Literature Review of Thermal Decomposition Products and Toxicity / Journal of the American College of Toxicology. 1998. Vol. 7. N 2. P. 23 – 35.
18. Chen N., Gao S., Huo J., et al. Studies on high-temperature thermal transformation and dielectric property of aluminum-chromium phosphates / Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2014. Vol. 116. N 2. P. 875 – 879.
19. Krylov V. P. Modeling of electromagnetic properties of multicomponent material / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2018. Vol. 84. N 7. P. 38 – 41 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-38-41
20. Boykov A. K., Pavlov V. V., Ponomarev V. P., et al. Definition of characteristics of steklotekstolit at high temperatures / In book: Materials of radome. — Moscow: ONTI VIAM, 1964 [in Russian].
21. Pavlov V. V., Semenova G. P. Dependence of dielectric permeability of a steklotekstolit on its components / In book: Materials of radome. — Moscow: ONTI VIAM, 1964 [in Russian].

REFERENCES