

УДК 537.868.3

## ПОГЛОЩЕНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

*С. В. Егоров, А. Г. Еремеев, И. В. Плотников, К. И. Рыбаков, В. В. Холопцев, Ю. В. Быков*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Спекание металлокерамических композиций при микроволновом нагреве является одним из перспективных методов создания функционально-градиентных материалов. В данной работе исследуется поглощение микроволнового излучения в компактированных смесях металлических и диэлектрических порошков. В рамках приближения эффективной среды рассчитан коэффициент микроволнового поглощения в зависимости от массовой доли металлических частиц, их размера и температуры. Предложен экспериментальный метод определения коэффициента микроволнового поглощения, основанный на измерениях температуры образцов при их нагреве микроволновым излучением в сверхразмерной рабочей камере. Приведены коэффициенты микроволнового поглощения порошковых композиций  $Al_2O_3-Ni$ , измеренные предложенным методом. Продемонстрировано согласие между теоретическими и экспериментальными результатами.

### ВВЕДЕНИЕ

С развитием современных отраслей техники возрастает потребность в использовании изделий и узлов, в которых улучшение функциональных свойств достигается за счёт соединения разнородных материалов. Проблема создания изделий, сохраняющих прочностные свойства в условиях воздействия высоких температур, механических напряжений и агрессивных сред, может быть решена при разработке новых методов соединения разнородных керамических и металлических материалов. Один из наиболее многообещающих таких методов основывается на идее создания функционально-градиентных материалов с целенаправленно созданной пространственно-неоднородной композицией и градиентными функциональными свойствами (см., например, [1]).

Соединения разнородных материалов, выполненные с использованием известных традиционных технологий, зачастую не отвечают постоянно растущим требованиям к нагрузкам и условиям эксплуатации получаемых изделий. В качестве перспективного метода получения функционально-градиентных материалов рассматривается спекание порошковых композиций с пространственно-неоднородным составом при нагреве микроволновым излучением [2, 3].

Принципиальной особенностью использования микроволнового электромагнитного поля для спекания является возможность локального нагрева металлокерамического материала с пространственно-неоднородной структурой. Реализация такого нагрева достигается за счёт селективного выделения энергии в области максимального поглощения микроволнового излучения. Регулирование температурного профиля открывает возможность целенаправленного управления механическими напряжениями в создаваемой структуре и является уникальной особенностью метода создания функционально-градиентных материалов, использующего микроволновый нагрев.

Решение задачи создания необходимого температурного профиля в композиционно-градиентной среде требует знания микроволновых поглощательных свойств материалов, представляющих собой смесь металлических и керамических порошков. В зависимости от характера и концентрации металлических составляющих, плотности и температуры среды микроволновое поглощение в металлокерамических композиционных материалах варьируется в широких пределах.

Целью данной работы является определение поглотительных свойств таких материалов в миллиметровом диапазоне длин волн при температурах вплоть до температуры спекания композиций, которая превышает  $1000^\circ\text{C}$ . При столь высоких температурах использование традиционных волноводных методов измерения диэлектрических свойств материалов весьма затруднительно. Применение методов, основанных на использовании волновых пучков миллиметрового излучения, также связано с большими техническими трудностями, обусловленными необходимостью использования высокотемпературных нагревательных устройств [4–6]. Кроме того, поглощение миллиметрового излучения в металлокерамических композиционных материалах, как правило, велико, вследствие чего точность определения их диэлектрических свойств с использованием открытых квазиоптических резонаторов в качестве измерительных систем невысока. В данной работе предложен метод определения коэффициента поглощения миллиметрового излучения материалами, основанный на измерениях температуры нагреваемых излучением образцов, помещённых в сверхразмерную в масштабе длины волны рабочую камеру. Полученные данные о микроволновом поглощении в образцах, спрессованных из порошковых смесей  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ni}$ , сопоставляются с расчётами, выполненными в приближении эффективной среды.

## 1. РАСЧЁТ МИКРОВОЛНОВОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ

Микроволновое поглощение в композиционных металлокерамических материалах обусловлено как диэлектрическими потерями в керамической составляющей материала, так и омическими потерями, связанными с протеканием токов проводимости в металлических частицах. Эти токи вызываются переменным электрическим полем, индуцированным магнитной компонентой микроволнового поля. Для определения потерь электромагнитной энергии в композиционном металлокерамическом материале необходимо знание его комплексных магнитной  $\mu = \mu' + i\mu''$  и диэлектрической  $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$  проницаемостей.

Микроволновая мощность  $w$ , поглощаемая в единичном объёме материала, определяется как сумма потерь диэлектрического и магнитного типов:

$$w = w_e + w_m = \frac{\omega}{8\pi} \varepsilon'' |\mathbf{E}|^2 + \frac{\omega}{8\pi} \mu'' |\mathbf{H}|^2, \quad (1)$$

где  $\omega$  — угловая частота микроволнового излучения,  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  — амплитуды электрического и магнитного полей соответственно.

Эффективная магнитная проницаемость композиционного материала  $\mu$  зависит от размера и формы металлических частиц, их концентрации, проводимости металла и частоты излучения. Если статическая магнитная проницаемость керамики и металла равна единице, эффективная магнитная проницаемость композиционного материала выражается как

$$\mu = 1 + 4\pi\chi = 1 + 4\pi C_m \alpha, \quad (2)$$

где  $\chi$  — магнитная восприимчивость материала, равная произведению концентрации металла  $C_m$  и комплексной магнитной поляризуемости  $\alpha$  одной металлической частицы в переменном магнитном поле. Для сферической металлической частицы в однородном периодическом магнитном поле  $\alpha$  имеет вид [7]

$$\alpha = -\frac{3}{8\pi} \left[ 1 - \frac{3}{k^2 a^2} + \frac{3}{ka} \text{ctg}(ka) \right], \quad (3)$$

где  $a$  — радиус частицы,  $k = (1+i)/\delta$ ,  $\delta = c/\sqrt{2\pi\sigma\omega}$  — глубина проникновения магнитного поля в металл, т. е. толщина скин-слоя,  $c$  — скорость света,  $\sigma$  — проводимость металла. Как следует

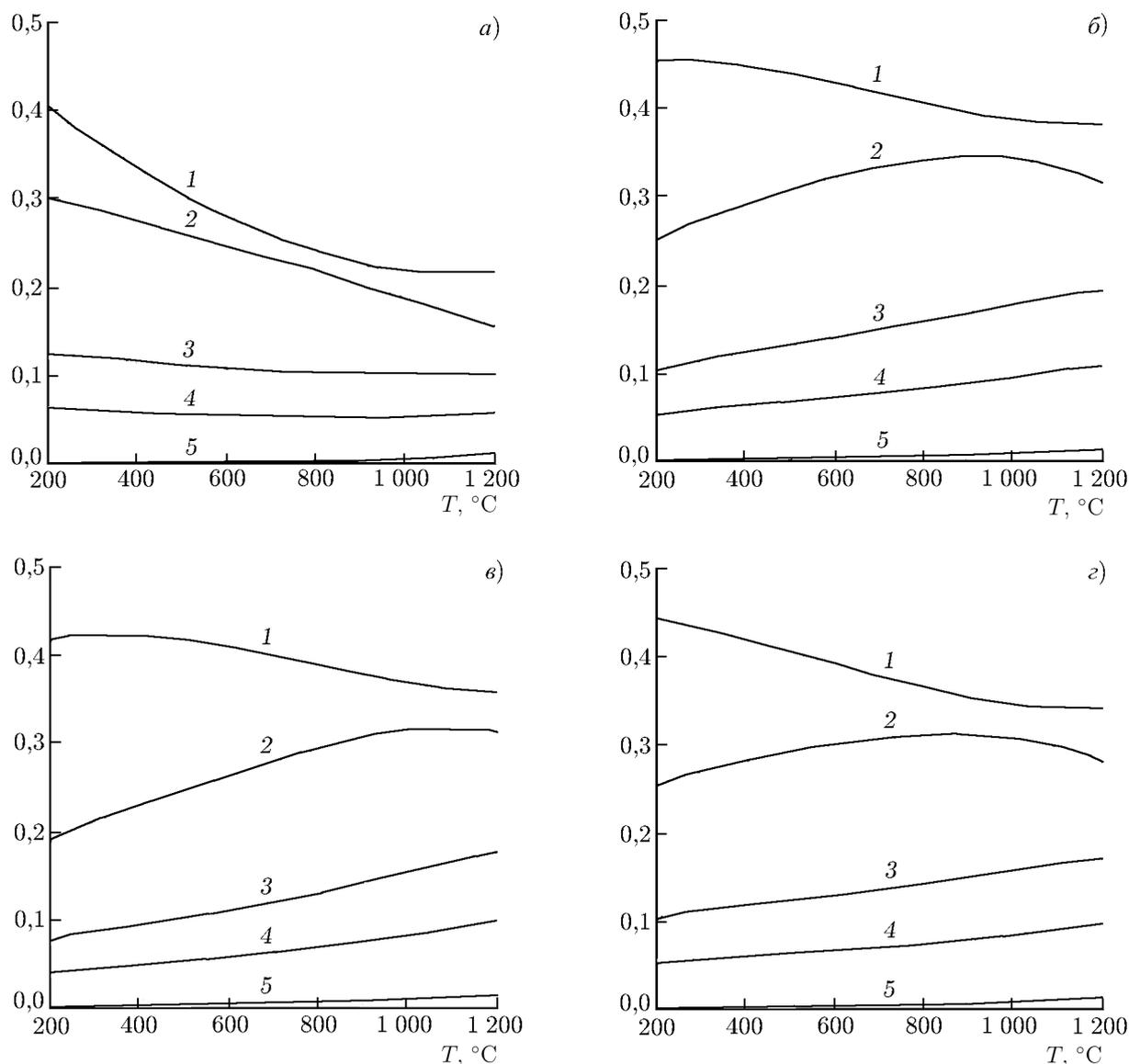


Рис. 1. Результаты расчётов отношения мощности микроволнового излучения, поглощённой в слое композиционного материала  $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ , к мощности падающего излучения в зависимости от температуры и массовой доли частиц  $\text{Ni}$ . Размер частиц  $\text{Ni}$  составляет 2 мкм (а), 4 мкм (б), 6 мкм (в), панель (з) соответствует равномерному распределению размеров в интервале 2÷6 мкм. Частота излучения 30 ГГц, толщина слоя 6 мм, относительная плотность композиционного материала 0,6. На всех рисунках кривая 1 соответствует массовой доле никеля в композите, равной 40%, 2 – 20%, 3 – 10%, 4 – 5% и 5 – 0%

из приведённого выше выражения, потери магнитного типа достигают максимума, когда  $a$  становится порядка  $\delta$ . При  $a \ll \delta$  имеем  $\alpha'' \propto a^2 \sigma$ , а при  $a \gg \delta$  получаем  $\alpha'' \propto a^{-1} \sigma^{-1/2}$ .

Эффективная диэлектрическая проницаемость композиционного материала  $\epsilon$  зависит от нескольких факторов, включая диэлектрические свойства компонентов, их относительное содержание, форму частиц и т. д. С известными ограничениями (см., например, [8])  $\epsilon$  может быть определена в приближении эффективной среды. При таком подходе все компоненты композита

рассматриваются как сферические включения в материале с искомой эффективной проницаемостью, которая находится как корень уравнения

$$\sum_j C_j (\varepsilon_j - \varepsilon) \frac{3\varepsilon}{2\varepsilon + \varepsilon_j} = 0, \quad (4)$$

где  $C_j$  — объёмное содержание, а  $\varepsilon_j$  — диэлектрическая проницаемость каждого компонента композита: металла, керамики и пустоты. Диэлектрическая проницаемость металла определяется в основном её мнимой частью, так что  $\varepsilon_m = i4\pi\sigma/\omega$ .

Расчёт поглощаемой микроволновой мощности наиболее просто провести, рассматривая падение плоской электромагнитной волны на плоский слой металлокерамического композиционного материала с рассчитанными эффективными диэлектрической и магнитной проницаемостями. В результате можно получить зависимость коэффициента микроволнового поглощения такого материала от температуры, массовой доли и размера частиц металла.

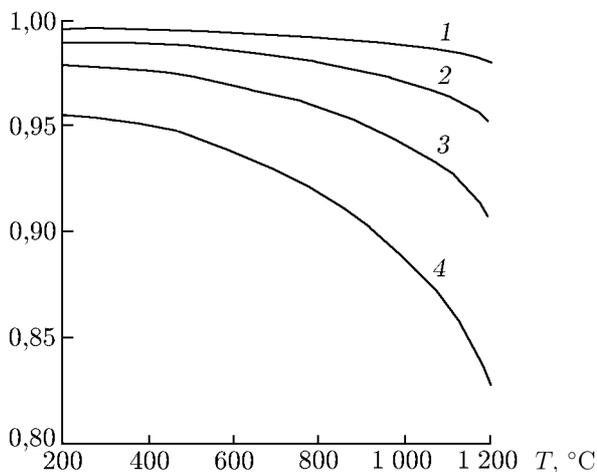


Рис. 2. Результаты расчётов отношения потерь магнитного типа к полной поглощённой мощности в слое композиционного материала Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в зависимости от температуры и массовой доли частиц Ni. Размер частиц Ni равномерно распределён в интервале 2÷6 мкм. Частота излучения 30 ГГц, толщина слоя 6 мм, относительная плотность композиционного материала 0,6. Кривая 1 соответствует массовой доле никеля в композите равной 40 %, 2 — 20 %, 3 — 10 % и 4 — 5 %.

ближается к половине мощности падающего на него излучения, что указывает на возможность эффективного нагрева композиционных материалов излучением миллиметрового диапазона. Зависимость коэффициента поглощения от массовой доли металлических частиц может быть использована в целях управления температурным профилем при спекании функционально-градиентных материалов путём варьирования их композиционного состава. Среди трёх выбранных размеров частиц наибольшее поглощение достигается, когда их размер равен 4 мкм. Характер поглощения в композиционном материале, в котором частицы никеля равномерно распределены по размерам, слабо отличается от поглощения в монодисперсном материале с размером частиц, равным среднему по распределению.

Расчёты микроволнового поглощения проводились для композиционных материалов, представляющих собой смесь порошков никеля и оксида алюминия. В них использовались приведённые в [9] данные по температурной зависимости проводимости никеля, а данные для диэлектрических свойств оксида алюминия в зависимости от температуры были взяты из [5]. На частоте 30 ГГц толщина скин-слоя в никеле изменяется от 1,0 мкм при 200 °C до 1,8 мкм при 1200 °C. На рис. 1а–в приведены результаты расчётов поглощённой микроволновой мощности для частиц никеля с размерами 2; 4 и 6 мкм и для пяти различных значений массовой доли никеля в композите, которые соответствуют использованным в экспериментах. На рис. 1г приведены результаты расчётов поглощённой микроволновой мощности для композиционного материала, в котором частицы никеля равномерно распределены по размерам в интервале 2÷6 мкм.

Как следует из этих результатов, микроволновое поглощение резко возрастает с увеличением содержания металлической фракции. Мощность, поглощаемая в рассматриваемом слое, при-

Коэффициент поглощения в образцах, содержащих металлические частицы, сравнительно слабо зависит от температуры. Данная особенность связана с тем, что в то время как проводимость никеля и, соответственно, мощность потерь магнитного типа убывают с ростом температуры, диэлектрические потери в оксиде алюминия и, соответственно, мощность потерь электрического типа возрастают. Таким образом, два этих эффекта в определённой степени компенсируют друг друга.

На рис. 2 приведён график, иллюстрирующий отношение потерь магнитного типа к общей поглощённой энергии микроволнового излучения в композиционном материале. Нетрудно видеть, что в большинстве случаев потери магнитного типа вносят основной вклад в поглощение. Потери электрического типа становятся заметными только при высокой температуре в образцах с низким содержанием металлической фракции. Это отражает то обстоятельство, что диэлектрические потери в керамическом материале резко возрастают при высоких температурах, в то время как проводимость металлов уменьшается плавно.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Образцы композиционного состава были приготовлены холодным изостатическим прессованием смеси порошков оксида алюминия и никеля с массовой долей никеля  $X_{Ni}$ , равной 0; 5; 10; 20; 40 и 80%. Средний размер частиц равнялся  $2\div 3$  мкм для порошка оксида алюминия и  $2\div 6$  мкм для порошка никеля. Прессованные образцы имели форму цилиндров с диаметром 10 мм и высотой 6 мм. Плотность образцов составляла  $56\div 61\%$  от теоретической плотности, т. е. плотности беспористого материала соответствующего состава.

Образцы нагревались в рабочей камере гиротронного комплекса, работающего на частоте 30 ГГц [10], до различных температур в интервале от 200 до 1200 °С. Его схема приведена на рис. 3. Выходное излучение гиротрона транспортируется к рабочей камере трёхзеркальной квазиоптической системой. Преобразователь, установленный на выходном волноводе гиротрона, конвертирует его рабочую моду  $TE_{02}$  в требуемую смесь мод  $TE_{02}$ ,  $TE_{13}$ , и  $TE_{22}$ , образующих параксиальный волновой пучок. Трёхмерный профиль металлических зеркал рассчитан таким образом, чтобы на входном окне рабочей камеры указанный пучок имел квазиплоский фронт с распределением интенсивности в поперечном сечении, близким к гауссовому [11].

Конструкция рабочей камеры гиротронного комплекса обеспечивает высокую однородность распределения микроволнового поля в нагреваемых материалах. Для использованной камеры с диаметром 50 см и высотой 60 см отношение её объёма к кубу длины волны излучения порядка  $10^5$ , и она работает в сверхмногомодовом режиме [12, 13], т. е. вводимый в рабочую камеру волновой пучок возбуждает одновременно большое количество колебательных мод, полосы возбуждения которых перекрываются. Этим обеспечивается высокая эффективность согласования рабочей камеры, т. е. малость мощности отражённого от неё излучения. Выходящее из камеры через её входное окно слабое отражённое излучение представляет собой суперпозицию большого количества поперечных мод и рассеяно в широкий телесный угол. Оно поглощается в покрытой поглотителем микроволнового излучения водоохлаждаемой плите, расположенной вне трассы транспортируемого волнового пучка внутри металлического бокса, который окружает все компоненты линии передачи излучения.

Для дополнительного объёмного выравнивания распределения поля, образуемого суперпозицией полей множества одновременно возбуждаемых мод, камера снабжена установленным в ней подвижным рассеивателем излучения. Можно полагать, что электромагнитное поле в такой камере равномерно распределено по её объёму и существует в виде распространяющихся во всех направлениях и отражающихся от стенок плоских волн. Нетрудно оценить, что мощность потерь,

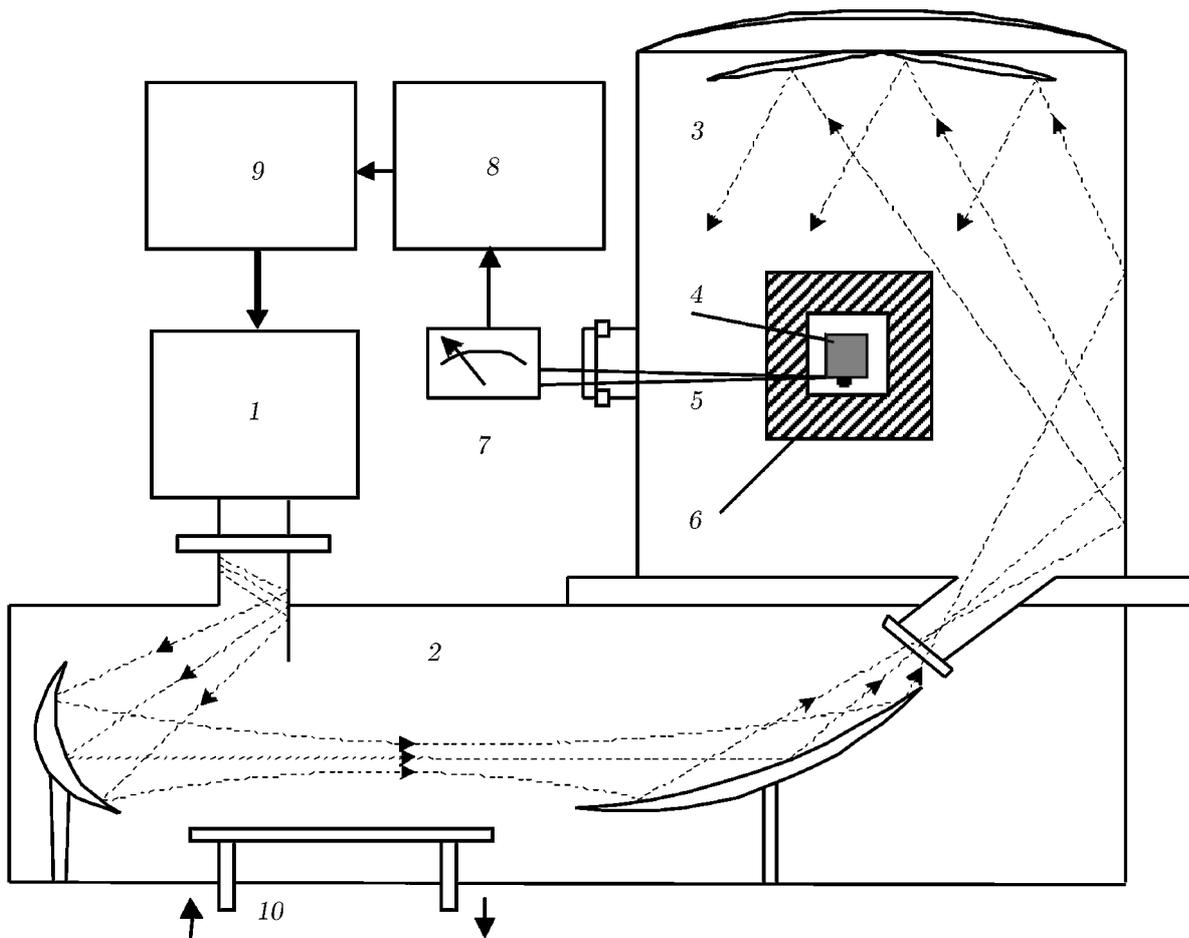


Рис. 3. Схема гиротронного комплекса для высокотемпературной микроволновой обработки материалов: 1 — гиротрон, 2 — квазиоптическая линия передачи, 3 — рабочая камера, 4 — образец, 5 — термопара, 6 — теплоизолирующий бокс, 7 — мультиметр, 8 — компьютерная система управления, 9 — источники питания гиротрона, 10 — поглотитель излучения, выходящего из рабочей камеры

связанных с выходом излучения обратно в линию передачи через входное окно камеры с диаметром 5 см, и потерь в исследуемом образце с характерным размером порядка 1 см на два порядка меньше мощности потерь в стенках камеры. Полагая для простоты, что всё введённое в рабочую камеру микроволновое излучение поглощается в её стенках, нетрудно получить приближённую формулу для плотности потока энергии  $\Xi$  излучения в камере:

$$\Xi = \frac{P_{\text{inp}}}{S(1-R)}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{inp}}$  — мощность излучения, введённого в камеру,  $S$  — площадь внутренней поверхности нагревной камеры,  $R$  — коэффициент отражения микроволнового излучения от её стенок. В условиях описываемых экспериментов внутренние стенки камеры были выполнены из алюминиевого сплава, для которого  $1 - R \approx 2 \sqrt{\omega/(2\pi\sigma)} \approx 0,01$ .

Для снижения тепловых потерь исследуемые образцы помещались в теплоизолирующий бокс, изготовленный из слабо поглощающей микроволновое излучение высокопористой окиси алюминия. Температура испытуемого образца измерялась Pt–Pt–Rh термопарой. Скорость нагрева

образца до наперёд заданной температуры равнялась  $30^\circ\text{C}/\text{мин}$ . По достижении заданной температуры микроволновое излучение отключалось и образец свободно охлаждался.

Коэффициент поглощения энергии излучения образцом,  $\eta$ , определялся из скоростей его нагрева и остывания,  $(dT/dt)_+$  и  $(dT/dt)_-$ , непосредственно перед выключением микроволнового излучения и после него. Уравнения энергетического баланса для этих двух случаев можно записать в виде

$$c_{\text{eff}}m(dT/dt)_+ = \eta P - E; \quad c_{\text{eff}}m(dT/dt)_- = -E, \quad (6)$$

где  $c_{\text{eff}}$  и  $m$  — эффективная теплоёмкость и масса образца,  $P$  — мощность падающего на образец излучения,  $E$  — мощность тепловых потерь в образце. Теплоёмкость  $c_{\text{eff}} = X_{\text{Ni}}c_{\text{Ni}} + (1 - X_{\text{Ni}})c_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ , где  $X_{\text{Ni}}$  — массовая доля никеля в образце,  $c_{\text{Ni}}$  и  $c_{\text{Al}_2\text{O}_3}$  — зависящие от температуры значения удельной теплоёмкости никеля и оксида алюминия [9].

Мощность падающего на образец микроволнового излучения в принятом приближении однородного и изотропного распределения излучения в объёме камеры согласно (5) даётся приближённой формулой

$$P \approx \Xi S_s = \frac{P_{\text{inp}}}{1 - R} \frac{S_s}{S}, \quad (7)$$

где  $S_s$  — площадь поверхности образца.

Мощность введённого в камеру микроволнового излучения  $P_{\text{inp}}$  определялась по заранее полученным зависимостям мощности от параметров питания гиротрона. Для построения этих зависимостей водоохлаждаемый калориметрический измеритель мощности микроволнового излучения помещался на входе волнового пучка в рабочую камеру. Ошибка определения мощности микроволнового излучения не превышала 5% во всём диапазоне используемых мощностей 200 Вт ÷ 2,5 кВт. Диссипирующая в поглощающей плите отражённая мощность, измеренная калориметрическим методом, не превышала 5% от подводимой мощности.

Таким образом, исключая  $E$  из уравнений (6) и используя оценку (7), на основании данных о  $P_{\text{inp}}$  и  $(dT/dt)_+$  и  $(dT/dt)_-$  можно экспериментально определить коэффициент поглощения излучения образцом:

$$\eta \approx \frac{1 - R}{P_{\text{inp}}} \frac{S}{S_s} c_{\text{eff}}m [|(dT/dt)_+| + |(dT/dt)_-|]. \quad (8)$$

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений коэффициентов микроволнового поглощения, выполненных описанным выше методом, представлены точками на рис. 4. В виде линий на нём показаны аналогичные зависимости, полученные в результате численного расчёта.

Из приведённых на рис. 4 данных следует, что теоретические и экспериментальные результаты находятся в согласии при массовой доле порошка никеля, лежащей в интервале 10 ÷ 40%. Расхождения в областях малых и больших значений доли металлической составляющей объясняются как упрощённым характером использованной теоретической модели, так и особенностями выполненных измерений поглощения.

Зависимости, полученные из численных расчётов в одномерной геометрии, демонстрируют осцилляции поглощённой энергии, связанные с резонансными явлениями в плоском слое поглощающей среды. При этом нетрудно видеть, что зависимость поглощения от температуры является несущественной: она лишь сдвигает положение резонансных максимумов поглощения, не влияя на общий вид его зависимости от концентрации. В экспериментальных условиях, когда образцы имеют цилиндрическую форму и вся их поверхность облучается микроволнами, резонансные явления проявляются намного слабее.

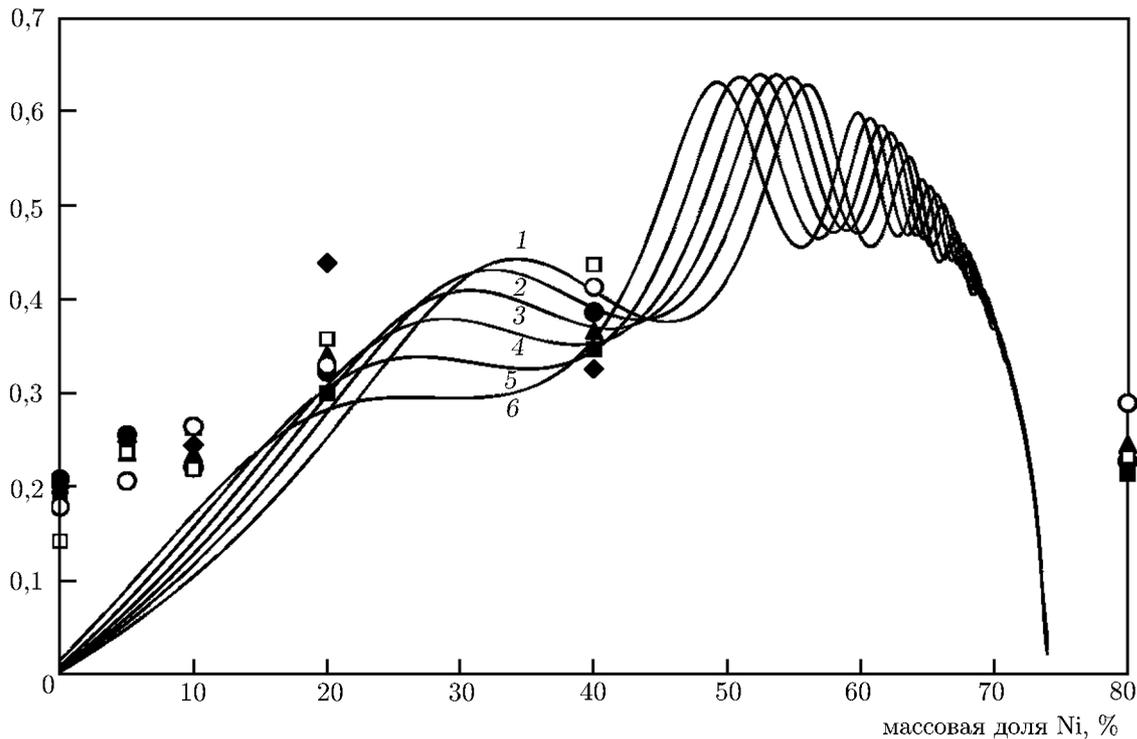


Рис. 4. Результаты измерений и расчёта коэффициента микроволнового поглощения в композиционных материалах Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в зависимости от температуры и массовой доли частиц Ni: символы — экспериментальные данные, линии — результаты расчётов для шести значений температур в интервале 200÷1200 °С. Линия 1 соответствует 200 °С, 2 — 400 °С, 3 — 600 °С, 4 — 800 °С, 5 — 1000 °С и 6 — 1200 °С. ◆ соответствуют 200 °С; ■ — 400 °С, ▲ — 600 °С, ● — 800 °С, ○ — 1000 °С и □ — 1200 °С. По оси ординат отложено отношение поглощённой мощности и падающей. При вычислениях принималось, что размер частиц Ni равномерно распределён в интервале 2÷6 мкм, частота излучения 30 ГГц, толщина слоя композиционного материала 6 мм, относительная плотность композиционного материала 0,6

Зависимость микроволнового поглощения от массовой доли металлических частиц в металлокерамическом композиционном материале имеет выраженный максимум, соответствующий ситуации, когда содержание металла достаточно велико, но ещё не достигает порога перколяции. Согласно численным расчётам, использующим приближение эффективной среды и предположение о сферической форме частиц, наибольшее поглощение наблюдается в образцах с массовой долей никеля 50÷60 %, а перколяция наступает при значении этого параметра, примерно равном 74 %. При достижении перколяционного порога поглощение стремится к нулю из-за практически полного отражения излучения от слоя проводящего материала.

В эксперименте образцы с массовой долей никеля 80 % нагреваются микроволновым излучением, хотя и менее эффективно, чем образцы с массовой долей никеля 40 % и 20 %. При достаточно высоких температурах при нагреве в воздушной атмосфере частицы никеля окисляются и существенной перколяции не происходит. Как показано в [14], даже металлические порошковые компакты в случае покрытых окислами частиц металла могут иметь достаточно высокий коэффициент поглощения микроволнового излучения. Кроме того, микроскопическое исследование показало, что частицы никеля в исследованных металлокерамических образцах с большой массовой долей металлической составляющей агломерируют, деформируются и принимают неправильную форму в процессе прессования. Морфология этих частиц может дополнительно

изменяться в ходе спекания, которое происходит при высоких температурах. Их распределение по размерам существенно отличается от равномерного, которое использовалось в расчётах. Все эти факторы могут заметно влиять на эффективные диэлектрические свойства композиционного материала.

Точность измерения микроволнового поглощения в условиях описанных экспериментов ограничена несколькими факторами. Пористый материал теплоизолирующего бокса, в котором размещались образцы при нагреве, имеет хотя и малые, но ненулевые микроволновые потери и теплоёмкость, что приводит к уменьшению скорости остывания образцов ( $dT/dt$ ) – после выключения микроволнового излучения. Следствием этого является завышение определённого в экспериментах значения коэффициента микроволнового поглощения. Как видно из приведённых на рис. 4 экспериментальных данных, такое завышение проявляется преимущественно в образцах с низким содержанием частиц Ni (порядка 0–5 % по массе). Реальное поглощение в образцах с существенно преобладающей долей порошка оксида алюминия, имеющей низкие микроволновые потери, сравнительно мало, и для их нагрева до тех же температур требуется большая мощность микроволнового излучения и, следовательно, больший разогрев теплоизолирующего материала бокса. Кроме того, в использованной порошковой композиции при высоких температурах возможны химические реакции окисления никеля и образования интерметаллидов  $Ni_xAl_y$ , сопровождающиеся выделением тепла. Данные эффекты несущественны с точки зрения демонстрации принципа описываемого метода и могут быть достаточно легко устранены при нагреве исследуемых материалов в вакууме и без использования теплоизолирующих устройств.

Оценки показывают, что относительная точность измерений коэффициента поглощения при промежуточных значениях концентрации металлической фракции 10–40 % по массе в проведённых экспериментах составляет  $\pm 15\%$ . Как следует из результатов расчётов и экспериментов по спеканию функционально-градиентных материалов, такой точности вполне достаточно для выбора оптимальных режимов их микроволнового нагрева [15].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен экспериментальный метод определения микроволнового поглощения в композиционных металлокерамических материалах с различным содержанием металлической фракции. Он основан на измерениях температуры образцов, нагреваемых микроволновым излучением в сверхразмерной (в масштабе длины волны) рабочей камере. Данный метод применим как для слабопоглощающих материалов, так и для материалов со значительным микроволновым поглощением.

Теоретически проанализировано поглощение миллиметровых волн в композиционных металлокерамических материалах. Показано, что оно определяется преимущественно потерями магнитного типа.

С помощью предложенного метода экспериментально определены коэффициенты поглощения микроволнового излучения в образцах, спрессованных из мелкодисперсных порошков никеля и оксида алюминия в широком интервале значений относительных содержаний этих фракций. Согласие между экспериментальными и теоретическими результатами демонстрирует принципиальную применимость предложенного метода.

Данные исследования частично поддержаны РФФИ совместно с Министерством промышленности и инноваций Нижегородской области (грант 09–02–97046). Часть результатов получены при проведении поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miyamoto Y., Niino M., Koizumi M. // *Functionally Graded Materials* / Ed. by I. Shiota, Y. Miyamoto. Elsevier, 1997. P. 1.
2. Willert-Porada M., Borchert R. // *Functionally Graded Materials* / Ed. by I. Shiota, Y. Miyamoto. Elsevier, 1997. P. 349.
3. Katakam S., Krishna D. S. R., Kumar T. S. S. // *Mater. Lett.* 2003. V. 57. P. 2716.
4. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах / Под ред. Р. А. Валитова, Б. И. Макаренко. М.: Радио и связь, 1984. 296 с.
5. Ho W. W. // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 1988. V. 124. Microwave processing of materials. P. 137.
6. Паршин В. В., Гарин Б. М., Мясникова С. Е., Орленков А. В. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2004. Т. 47, № 12. С. 1087.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Электродинамика сплошных сред.* М.: Наука, 1992. 664 с.
8. Bergman D. J., Stroud D. // *Solid State Physics: Advances in Research and Applications.* V. 46. New York: Academic Press, 1992. P. 147.
9. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
10. Bykov Yu., Eremeev A., Flyagin V., et al. // *Ceramic Transactions.* Westerville: Amer. Ceram. Soc., 1995. V. 59. *Microwaves: Theory and Applications in Materials Processing III* / Ed. by D. E. Clark, D. C. Folz, S. J. Oda, R. Silbergitt. P. 133.
11. Bykov Yu., Denisov G., Eremeev A., et al. // *Proc. 29th European Microwave Conf., Munich, Germany, 1999.* V. 1, M-TuP1. P. 123.
12. Kremer F., Izatt J. R. // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* 1981. V. 2. P. 675.
13. Kimrey H. D., Janney M. A. // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 1988. V. 124. Microwave processing of materials. P. 367.
14. Rybakov K. I., Semenov V. E., Egorov S. V., et al. // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 99. Art. no. 023506.
15. Bykov Yu. V., Egorov S. V., Eremeev A. G., et al. // *Functional Materials.* 2001. V. 8, No. 1. P. 71.

Поступила в редакцию 7 декабря 2009 г.; принята в печать 16 июня 2010 г.

## ABSORPTION OF MICROWAVES IN METAL-CERAMIC POWDER MATERIALS

*S. V. Egorov, A. G. Eremeev, I. V. Plotnikov, K. I. Rybakov, V. V. Kholoptsev, and Yu. V. Bykov*

Sintering of metal-ceramic composites by microwave heating is a promising method for creation of functionally gradient materials. In this paper, we study the absorption of microwaves in compacted mixtures of metal and dielectric powders. The coefficient of microwave absorption is calculated in the framework of the effective-medium approximation as a function of the mass fraction, dimensions, and temperature of metal particles. The experimental method for determination of the microwave absorption coefficient is proposed, which is based on the measuring of the sample temperature during its heating by microwaves in an oversized working chamber. The coefficients of microwave absorption in powder composites  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ni}$ , which were measured by the proposed method, are presented. An agreement between the theoretical and experimental results is demonstrated.