

ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОСИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДИАПАЗОНЕ СВЧ

В.И. Клапченко,
Г.Е. Краснянский,
В.А. Глыва,
И.А. Азнаурян

Металлосиликатные композиционные материалы (МКМ), сочетающие аморфизованные силикатные вещества и металлические порошки [1], обладают значительными технологическими и функциональными преимуществами по сравнению с ферромагнетиками, специальной керамикой и другими материалами, предназначенными для защиты от электромагнитного излучения. При этом, наиболее существенным, является возможность управления такими свойствами МКМ, как электропроводность, теплопроводность, модуль упругости и т.п. за счет направленного воздействия на микроструктуру композита. Высокие физико-механические свойства делают возможным различные применения МКМ: от облицовочных (с том числе наружных) изделий до конструкционных деталей. При этом, изменяя вид силикатного компонента, можно изменять и долговечность изделий.

Особенность электрофизических свойств МКМ заключается в том, что при приближении объемной доли металлического компонента к некоторому значению (порогу протекания) электропроводность системы скачкообразно увеличивается (на 9 – 11 порядков), а диэлектрическая проницаемость растет до значений 10^4 [3, 4]. В соответствии с [5], наличие у МКМ подобных электрофизических характеристик позволяет предполагать, что, при соответствующей оптимизации состава, композиции на основе металлических порошков и аморфизованных силикатов могут обладать ярко выраженными радиоэкранирующими свойствами.

Целью настоящей работы является изучение радиоэкранирующих свойств металлосиликатных материалов, а также разработка математической модели, которая позволяла бы не только правильно определять значения

коэффициентов поглощения и отражения, но и прогнозировать свойства композиций.

Исходные материалы и методика исследования

Приготовление образцов осуществляли с использованием следующих исходных материалов. В качестве диэлектрического компонента и, одновременно, вяжущего, обеспечивающего водостойкость и долговечность композиций, использовались аморфизованные дисперсные гидросиликаты кальция (ГСК) и портландцемент марки 500.

В качестве электропроводного компонента использовали порошок меди промышленной марки ПМ-1.

Для проведения испытаний были изготовлены образцы – плитки размерами 125×66×8 мм по технологиям, предложенным в [2, 8]. Формование образцов осуществляли холодным прессованием смеси порошков при давлении 100 МПа. Образцы на основе ГСК никакой последующей обработке не подвергались, в то время как образцы на основе портландцемента в течении суток твердели в воде.

Коэффициент ослабления и отражения электромагнитного излучения металлосиликатным материалом измеряли на стандартном панорамном измерителе коэффициента стоячей волны и ослабления Я2Р-67.

При измерении ослабления, исследуемые образцы помещали в промежуток между излучающим и приемным концом измерительной линии. При этом согласование открытых концов волноводов производили при помощи рупоров. При измерении отражения образцы крепили к торцу измерительной линии. Измерение ослабления и отражения проводили не на одной фиксированной частоте, а в интервале 19-26 ГГц, что позволяло учитывать ошибки, связанные с интерференцией.

Результаты и обсуждение

Первоочередной задачей при изучении радиоэкранирующих свойств МСМ является получение теоретических зависимостей, дающих адекватное

описание процессов рассеяния электромагнитного излучения в теле композиционного материала.

При расчете коэффициента ослабления (D) и отражения (R) электромагнитной волны, падающей на композит, предполагали, что материал обладает изотропными электрофизическими свойствами и волна падает нормально к поверхности образца.

Решение уравнений Максвелла для амплитуды волны, распространяющейся в среде с поглощением, имеет вид (см. например, [9]):

$$E = E_0 e^{-inx/c} \cdot e^{-\chi\omega x/c}, \quad (1)$$

где E_0 – напряженность электрического поля падающей волны;

n – коэффициент преломления;

x – толщина образца;

ω – циклическая частота волны;

χ – коэффициент экстинкции среды, определяющий скорость затухания.

Используя [1] для коэффициента ослабления по мощности, получаем:

$$D = \frac{(n+1) + \chi^z}{4n} \exp\left[\frac{z\chi\omega x}{c}\right]. \quad (2)$$

Выражение для коэффициента отражения в случае нормально падающей волны имеет вид:

$$R = \frac{(n-1)^2 + \chi^z}{(n+1)^2 + \chi^z}. \quad (3)$$

При этом:

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}}; \quad (4)$$

$$\chi = \sqrt{\frac{\varepsilon' - \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}}, \quad (5)$$

где ε' и ε'' – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon + i \frac{4\pi\sigma}{\omega}, \quad (6)$$

где σ – электропроводность образца.

Отметим, что электрические потери, определяющие поглощение электромагнитной волны материалом, пропорциональны мнимой части, учитывающей как потери на диэлектрический гистерезис, так и джоулевы потери. Эти виды потерь при фиксированной частоте с макроскопической точки зрения неразличимы. В нашем случае, эффекты, связанные с диэлектрическим гистерезисом, пренебрежимо малы по сравнению с потерями за счет проводимости в исследованной области концентраций металлического компонента.

Таким образом, зная величины действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости образцов с различным содержанием металлического компонента, можно рассчитать зависимости коэффициента ослабления и отражения от объемного содержания электропроводного компонента.

Выражения для зависимостей σ и ε от объемной доли металлического компонента Θ в композициях «медь-ГСК» были получены ранее [3, 4] на основании аналогии с теорией фазовых переходов. Тогда при содержаниях металлического компонента, соответствующих допороговой области, зависимости $\varepsilon''(\Theta)$ и $\varepsilon'(\Theta)$ имеют вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon''(\Theta) &= \frac{4\pi\sigma_m}{\omega} \left\{ B_0 h(-\tau)^{-q} + B_1 \left[h^2 - \left(\frac{\omega\varepsilon_d}{4\pi\sigma_m} \right) \right] (-\tau)^{-p} \right\}; \\ \varepsilon'(\Theta) &= B_0 \varepsilon_d (-\tau)^{-q}, \end{aligned} \quad (7)$$

где σ_m – проводимость металлического компонента;

ε_d – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

q и p – критические индексы теории протекания;

θ_c – порог протекания,

$$\tau = \theta - \theta_c,$$

$$h = \sigma_d / \sigma_m.$$

При сравнении теоретических зависимостей [7] с экспериментальными для композита медь-портландцемент (рис. 1), проведенном по методу наименьших квадратов, получено:

$$\theta_c = 0,162; B_0 = 0,15; p = 3,5 \pm 0,054; q = 1 \pm 0,05,$$

что свидетельствует о хорошем соответствии аналитических и экспериментальных данных.

Зависимости коэффициента ослабления и отражения, рассчитанные по [2-7] с использованием приведенных выше данных, показаны на рисунке 2 вместе с экспериментальными данными.

Как показывает анализ данных, приведенных на рисунках 1 и 2, результаты теоретических расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными. При этом следует отметить, что измерения диэлектрической проницаемости и электропроводности проводились на низких частотах, а ослабления и отражения – в диапазоне СВЧ. Указанное обстоятельство дополнительно подтверждает адекватность использованной теоретической модели, в соответствии с которой дисперсия в достаточно широком диапазоне частот должна быть незначительной.

Полученные экспериментальные данные показывают, что при приближении концентрации металлического компонента к пороговой происходит резкое возрастание коэффициента ослабления электромагнитного излучения металлосиликатным материалом наряду с плавным увеличением коэффициента отражения. Это позволяет заключить, что при определенном содержании металлического компонента в

композиционном материале может быть получен материал, обладающий достаточно высоким коэффициентом ослабления при коэффициенте отражения не превышающем 0,7. При дальнейшем увеличении концентрации электропроводного компонента материал ведет себя практически, как металл, т.е. есть отражение, как и поглощение, очень велико.

Сравнение результатов, полученных для композитов медь-портландцемент и медь-ГСК (см. таблицу), дает возможность заключить, что в исследуемых системах изменение вещественного состава связующего компонента не приводит к качественному изменению экранирующих свойств. Определяющим фактором является близость концентрации металлического компонента к пороговой.

Таблица. *Защитные свойства электромагнитных экранов на основе металлосиликатных материалов*

Материал; Порог протекания, об. %	Содержание металла, об. %	Коэффициент отражения	Коэффициент ослабления, дБ
медь-ГСК, 15,3	15,00	0,71	7,6
	15,25	0,80	17,0
	15,50	0,85	32,0
медь- портландцемент, 1,62	0	0,31	2,5
	5	0,38	3,1
	10	0,44	7,5
	13	0,06	10,0
	15	0,70	15,3
	17	0,80	40,7

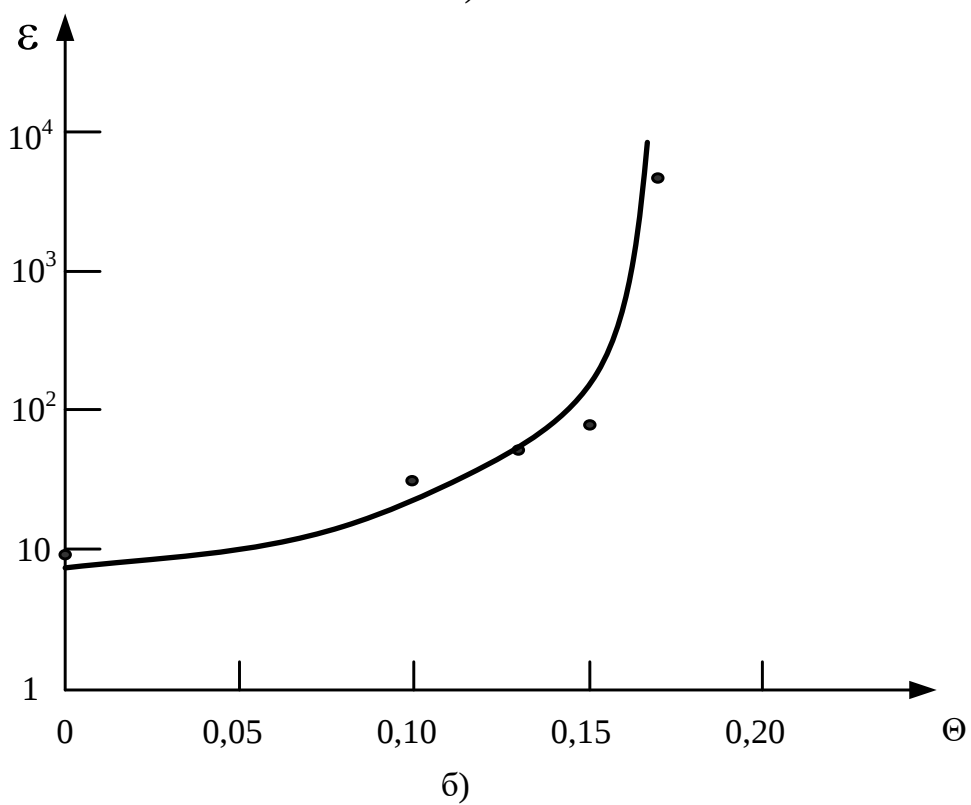
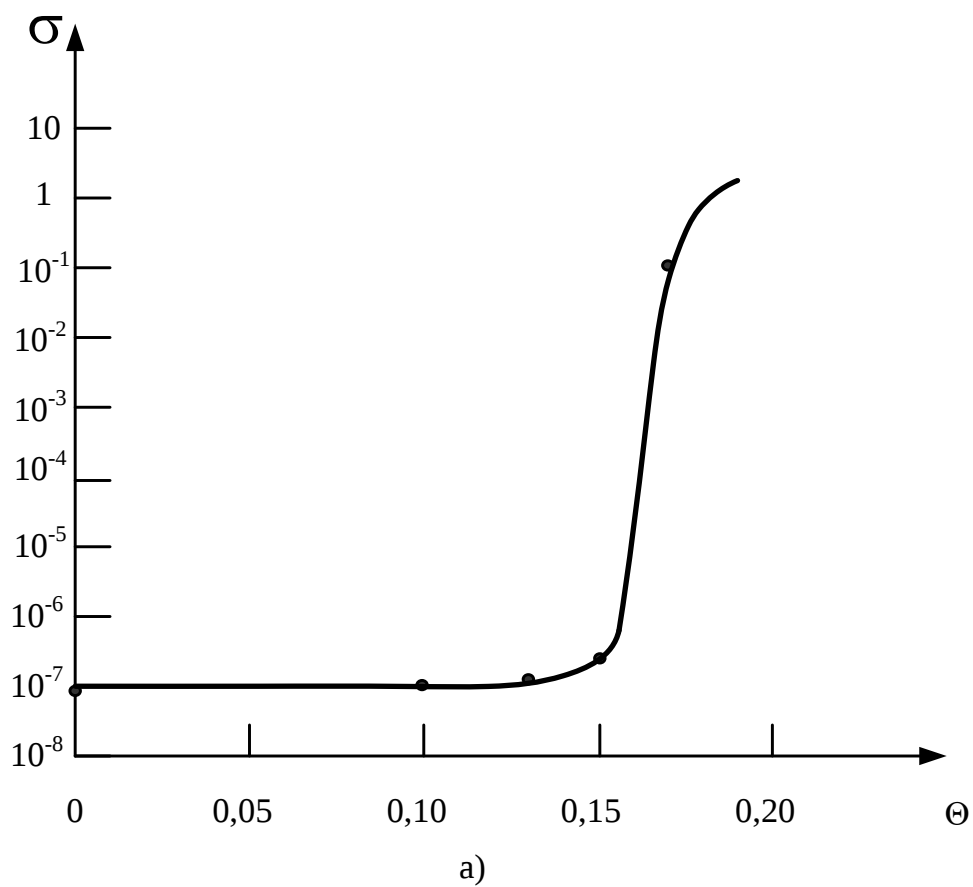


Рис. 1. Зависимости электропроводности (а) и диэлектрической проницаемости (б) от объёмной доли металлического компонента; точки – эксперимент, сплошная линия – теоретическая зависимость

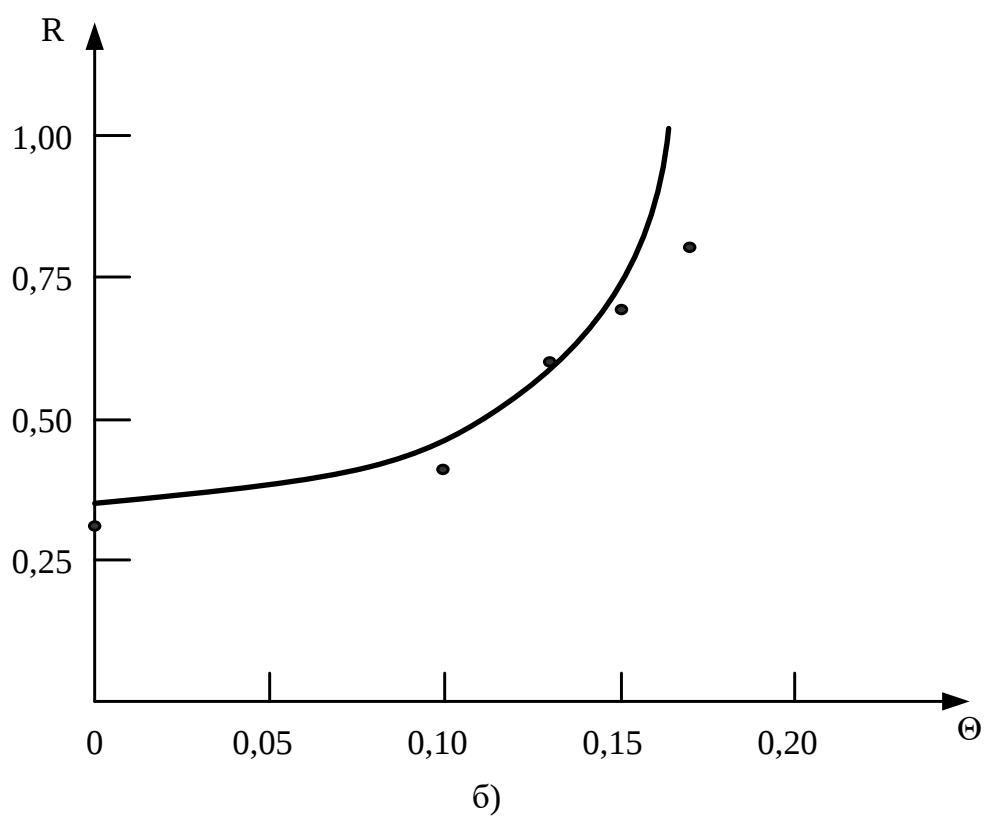
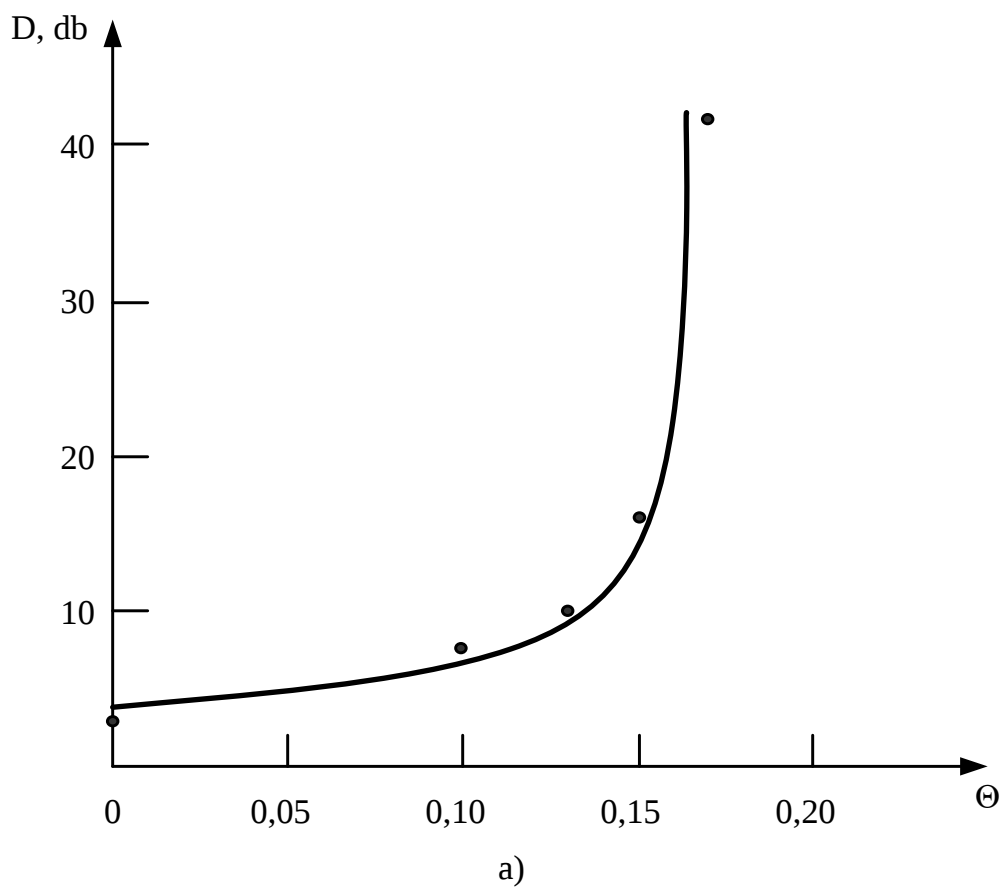


Рис. 2. Зависимости коэффициентов ослабления (а) и отражения (б) от объёмной доли металлического компонента; точки – эксперимент, сплошная линия – теоретическая зависимость

Это может быть объяснено на основании следующей качественной интерпретации эффекта аномального роста диэлектрической проницаемости электропроводности в композиционном материале. Каждая пара ближайших металлических кластеров, разделенных вблизи порога протекания тонкой диэлектрической прослойкой, может рассматриваться как некоторый конденсатор. Тогда, при приближении к порогу протекания, эффективная поверхность такого конденсатора стремится к бесконечности и, вследствие этого, резко возрастает эффективная емкость системы. При этом электрические потери в таком материале будут зависеть от сквозной проводимости и поляризационных свойств диэлектрической связки. В нашем случае, учитывая достаточно высокие диэлектрические свойства, как портландцемента, так и продуктов его гидратации - гидросиликатов кальция, последний фактор, как отмечалось ранее, играет незначительную роль. В то же время, физико-механические и физико-химические свойства композиций определяются, в первую очередь, свойствами цементирующей системы, как показано в [2-10] для рассмотренных материалов.

Данные, приведенные в таблице, не позволяют сделать вывод о влиянии вида электропроводного компонента на экранирующие свойства МСМ. Однако, можно считать, по-видимому, что это влияние не велико. Определяющим для экранирующих свойств МСМ является объёмное соотношение между электропроводным и диэлектрическим компонентами.

Выводы

1. На основании экспериментальных и теоретических исследований показана принципиальная возможность использования металлосиликатных композиционных материалов в качестве электромагнитных экранов, способных поглощать и рассеивать электромагнитное СВЧ-излучение.

2. Изучены поглощающие свойства металлосиликатных материалов вида медь-ГСК и медь-портландцемент. Показано, что увеличение содержания металлического компонента приводит к увеличению

коэффициентов поглощения и отражения электромагнитного излучения. При соответствующем подборе состава может быть получен материал, обладающий значительным поглощением при достаточно низком отражении. При содержании металла, превышающем пороговую концентрацию, экранирующие свойства материала подобны свойствам металлических экранирующих покрытий.

3. Предложена теоретическая модель, адекватно описывающая рассеяние и поглощение электромагнитного излучения гетерогенным материалом с диэлектрической связкой. Полученные выражения могут быть использованы при проектировании составов электромагнитных экранов.

Литература.

1. Рунова Р.Ф., Семенов Ю.Н., Максун С.Е.: Перспективы применения силикатных пресс-порошков для специальных материалов. Тез. докл. II Всесоюз. науч.-практ. конф. Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции, КИСМ, Киев, СССР, 1984, с. 100-102.

2. Глуховский В.Д., Рунова Р.Ф., Максун С.Е.: Вяжущие и композиционные материалы контактного твердения, Вища школа, Киев, Украина, 1991.

3. Краснянский Г.Е., Максун С.Е., Величко Т.П.: Электрофизические свойства металлосиликатных материалов контактного твердения, Тез. докл. III Всесоюз. науч.-практ. конф. Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции, КИСИ, Киев, СССР, 1989, с. 209-210.

4. Глуховский В.Д., Казанский В.М., Краснянский Г.Е., Максун С.Е.: Электропроводность металлосиликатных материалов контактного твердения, Известия АН СССР. Неорганические материалы, т. 24, N 5, 1988, с. 824-827.

5. *Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А.:* Материалы, поглощающие СВЧ-излучения, Наука, Москва, СССР, 1982.

6. *Taylor H.F.W.:* Cement Chemistry, Academic Press Ltd, London, 1990.

7. *Рунова Р.Ф., Максунев С.Е., Куприенко Е.П.:* Металлосиликатный материал для нагревательных изделий, Строительные материалы и конструкции, N 2, 1992, с. 11.

8. *Глуховский В.Д., Рунова Р.Ф., Максунев С.Е.:* Роль контактно-конденсационных процессов в синтезе прочности цементного камня, Цемент, N 10, 1989, с. 7-8.

9. *Ландау Л.Д. Лифшиц Е.М.:* Электродинамика сплошных сред, Гос. изд. физ. мат. лит., Москва, 1959.

10. *Максунев С.Е.:* Использование продуктов гидратации портландцемента для получения композиционных материалов. Цемент, N 11-12, 1991, с. 59-64.