

Технологические аспекты получения бронерадиопоглощающих керамических материалов и изделий

В работе изложены требования, предъявляемые к бронерадиопоглощающим материалам, приведены их физико-технические свойства. Представлены результаты исследования отражающей способности электромагнитного излучения различными радиопоглощающими материалами и разных конструкций изделий.

Ключевые слова: бронерадиопоглощающие материалы, коэффициент радиопоглощения, бронезлементы, электромагнитное излучение, ферриты, корундовая керамика.

Броневые керамические материалы – это группа материалов, препятствующих проникновению средств поражения (пуль, осколков снарядов), которые обладают высокой кинетической энергией в силу ее диссипации в результате хрупкого разрушения, фрагментирования и движения осколков керамической преграды, а также деформации и разрушения средств поражения.

На сегодняшний день нет общепринятых представлений о физике и механике разрушения хрупких материалов при их взаимодействии с высокоскоростными твердыми телами. Многочисленными экспериментами и теоретическими расчетами доказано, что эффективность керамической брони определяют следующие свойства: плотность (низкая); модуль упругости (высокий); твердость (высокая); прочность (заданный уровень); трещиностойкость (высокая).

К бронезлементам предъявляют и такое важное требование, как наличие радиопоглощающей способности. Радиопоглощающие материалы (РПМ) могут быть использованы для разнообразных целей: защиты средств вооружения и военной техники от обнаружения радиолокационными средствами противника; уменьшения помех и обеспечения электромагнитной совместимости; защиты персонала от электромагнитного излучения (ЭМИ); изготовления защитных панелей для бронезилов, бронетранспортеров и броневых автомобилей; создания безэховых камер и т.д.

В настоящее время в России и за рубежом интенсивно проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИР, ОКР) по поиску и разработке эффективных составов и высокотехнологичных процессов получения бронерадиопоглощающих композитов на керамической основе.

Настоящее исследование проведено в рамках совершенствования технологических основ получения ряда керамических материалов, выполняющих функции бронезащиты и поглощения ЭМИ.

Корундовая (алюмооксидная) керамика – самый ранний и наиболее используемый вид броневой керамики. Это обусловлено хорошим сочетанием ее целевых свойств и небольшой стоимостью изделий. Высокий уровень целевых свойств противопульной керамики должен соответствовать следующим значениям: относительная плотность – 96 %, микротвердость – 16 ГПа, прочность при изгибе – 300 МПа. В табл. 1 приведены свойства различных видов броневой керамики [1].

Таблица 1

Свойства различных видов броневой керамики

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Твер- дость H , ГПа	Модуль упруго- сти E , ГПа	Скорость рас- пространения звука c , 10 ⁻³ м/с	Предел проч- ности при изгибе σ , МПа	Трещино- стойкость K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}
Горячепрессованный:						
B ₄ C	2 500	38–39	450	13,0	450	3,3
TiB ₂	4 500	24–25	570	–	–	–
AlB ₁₂	2 600	37	405	12,5	–	2,8
CaB ₆	2 320	26	325	11,0	–	2,7
Реакционно-спеченный:						
B ₄ C	2 650	27–28	380	–	250	3,0
SiC	3 050–3 080	24–26	350–370	11,3	240–350	3,9–4,0
Спеченный Al ₂ O ₃	3 800–3 900	14–18	370–390	9,7	370–380	3,4–4,5
AlN	3 120	12	350	–	> 250	–
Броневая сталь «СПС-43»	7800	48–58	–	≈ 5	1 800–2 000	–

К настоящему времени разработано большое количество составов и технологий получения алюмооксидных материалов. Основным их недостатком является высокая температура обжига изделий. Для снижения температуры спекания, улучшения свойств корундовой керамики применяют различные добавки. Из многочисленных добавок, используемых для регулирования структуры образования и спекания корундовой керамики, особый интерес представляют оксиды магния и иттрия. В ранее выполненной работе [2] было установлено, что снижение температуры спекания на 50–100 °С и повышение физико-механических свойств корундовой бронекерамики может быть достигнуто путем использования мелкозернистого глинозема высокой чистоты марки СТ 800FG фирмы Almatix (Германия) и введения малых добавок MgO и Y₂O₃.

Технологический процесс изготовления алюмооксидной бронекерамики включает операцию мокрого помола исходных компонентов шихты в шаровых мельницах типа МШ-500 или МШ-1000. В процессе помола шихты в водную суспензию добавляют определенные органические вещества, позволяющие повысить качество суспензии и эффективность помола.

Следующей операцией технологии является получение пресс-порошка или гранулята. На этом этапе суспензия измельченной шихты подается в распылительное сушило, где под действием температуры в интервале 300–150 °С происходит удаление избытка влаги и образование гранул пресс-порошка, которые имеют преимущественно форму тора и размер, равный 90–120 мкм. Влажность гранулята составляет 0,2–0,46 %.

Из полученного гранулята получают изделия необходимого размера и формы путем двухстороннего осевого прессования. После операции прессования изделия обжигают в определенном режиме с максимальной температурой 1 650–1 700 °С. Одним из представителей бронезащитных элементов может служить бронеплитка с габаритами 50 × 50 × 7 мм (рис. 1).

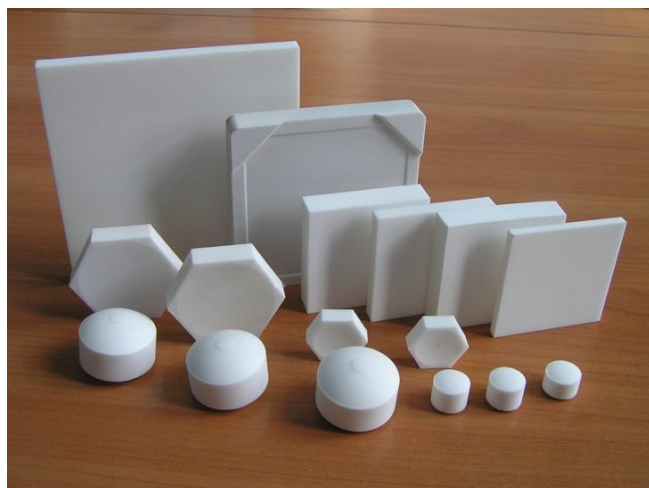


Рис. 1. Различные формы бронезащитных элементов из корундовой керамики

Применение в составах корундовой керамики на основе глинозема фирмы Almatix комплексных добавок, содержащих оксиды магния, алюминия, кремния, титана, иттрия, циркония с различным соотношением компонентов позволяет дополнительно снизить температуру спекания изделий на 20–120 °С с сохранением высокого уровня баллистических характеристик.

Наряду с регулированием свойств и технологии получения корундовой керамики методом модифицирования важным технологи-

ческим требованием является качество исходного сырья, в систему показателей которого входят: чистота (отсутствие примесей, соответствие стехиометрии), дисперсность, оптимальный гранулометрический состав, благоприятная морфология частиц, отсутствие агломератов и др. Поэтому при выполнении исследований по усовершенствованию технологических процессов получения корундовой бронекерамики этому фактору уделялось особое внимание [3].

Другими представителями класса бронекерамики являются материалы на основе карбида бора (B_4C), нитрида алюминия (AlN), которые обладают эффективными бронезащитными свойствами и по ряду показателей превосходят корундовую керамику (см. табл. 1), но технология их получения более энергоемкая и ресурсозатратная.

Основные технологические операции получения изделий из нитрида алюминия аналогичны технологии изготовления изделий из корундовой керамики, за исключением режимов обжига, которые предполагают нейтральную среду и повышенные температуры спекания.

В табл. 2 представлены физические свойства бронезащитного элемента, изготовленного на основе карбида кремния с добавлением нитрида алюминия, в сравнении с однофазным карбидом кремния. Образец на основе $SiC-AlN$ в виде диска диаметром $d = 20$ мм и высотой $h = 5$ мм был получен в установке плазменно-искрового синтеза при максимальной температуре 2100 °С в вакууме.

Таблица 2

Физические свойства композитного ($SiC-AlN$) бронезащитного элемента

Показатель	Тип керамики	
	SiC	SiC-AlN
Кажущаяся плотность, г/см ³	3,14	2,92
Водопоглощение, %	0,03	0,06
Пористость, %	0,01	0,19
Скорость звука, м/с	12 541	11 325
Модуль упругости, ГПа	429	326

Из данных табл. 2 следует, что композиционный материал, включающий карбид кремния и нитрид алюминия, имеет несколько пониженные значения кажущейся плотности, скорости звука, модуля упругости и незначительно увеличенные значения водопоглощения, открытой пористости. Отмеченные отличия в свойствах одно-

фазной (SiC) и двухфазной (SiC–AlN) керамики, видимо, связаны с разной структурой образующихся фаз материала. Учитывая незначительные отличия в свойствах этих типов керамики, можно предположить, что существенного изменения броневых свойств при использовании композиционного материала (SiC–AlN) не произойдет.

К радиопоглощающим керамическим материалам предъявляются специальные требования как по радиотехническим, так и по конструктивно-технологическим параметрам, среди которых наиболее важными являются: максимальное поглощение СВЧ-энергии, минимальное отражение СВЧ-энергии в широком диапазоне частот, минимальные масса и размеры, высокая механическая прочность и жесткость конструкции, высокая огнестойкость и минимально допустимый уровень выделения вредных веществ, технологичность в изготовлении, сохранение радиотехнических и эксплуатационных характеристик в течение длительного срока службы (высокая устойчивость к старению). Ряд электрофизических свойств радиопоглощающих материалов представлен в табл. 3.

Таблица 3

Электрофизические свойства некоторых радиопоглощающих материалов

Физические свойства	SiC	AlN	(MnO-ZnO) Fe ₂ O ₃
Теплопроводность, Вт/мК, при 25 °С	150	160...240	2,8...5,7
Диэлектрическая постоянная при 25 °С на частоте 1 МГц	40...42	8,8...10,5	8...10
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 1 МГц	0,05	0,0005	0,0010
Коэффициент температурного линейного расширения ($\cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) в диапазоне температур 25...400 °С (для кремния $3,5...4,0 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	3,7	4,3...4,6	5...10
Магнитная проницаемость	1	1	70...6 000

При взаимодействии ЭМИ с РПМ одновременно происходят процессы поглощения, рассеяния, отражения и интерференции радиоволн. Например, поглощение энергии за счет потерь на перемагничивание ферромагнетиков складывается из потерь на гистерезис, на вихревые токи и магнитное последствие.

Среди различных видов РПМ особое место занимают магнитные материалы, прежде всего ферриты. Важное преимущество ферритов состоит в их «широкополосности» – эффективности поглощения ЭМИ в широком диапазоне частот.

Процесс получения радиопоглощающих покрытий на основе ферритов начинается с измельчения исходного ферритового материала до необходимой фракции. Измельченную фракцию добавляют в формообразующую матрицу, в качестве которой может быть использована эпоксидная смола (ЭД-20).

На рис. 2 представлены результаты измерения коэффициента отражения электромагнитной энергии на сверхвысоких частотах для панелей, состоящих из эпоксидной смолы и марганец-цинкового феррита с содержанием 0; 2,5; 5,0; 10 мас. %.

Из полученных зависимостей коэффициента отражения для разных образцов следует, что образец из эпоксидной смолы имеет максимальный коэффициент отражения (0,9). Образцы, содержащие ферритовый наполнитель с разным содержанием, имеют значительно меньший коэффициент, колеблющийся в пределах 0,15–0,35 в диапазоне частот от 8–18 ГГц. Содержание ферритового поглотителя в образцах в пределах от 2,5–10 мас. % не оказывает существенного влияния на коэффициент отражения ЭМИ.

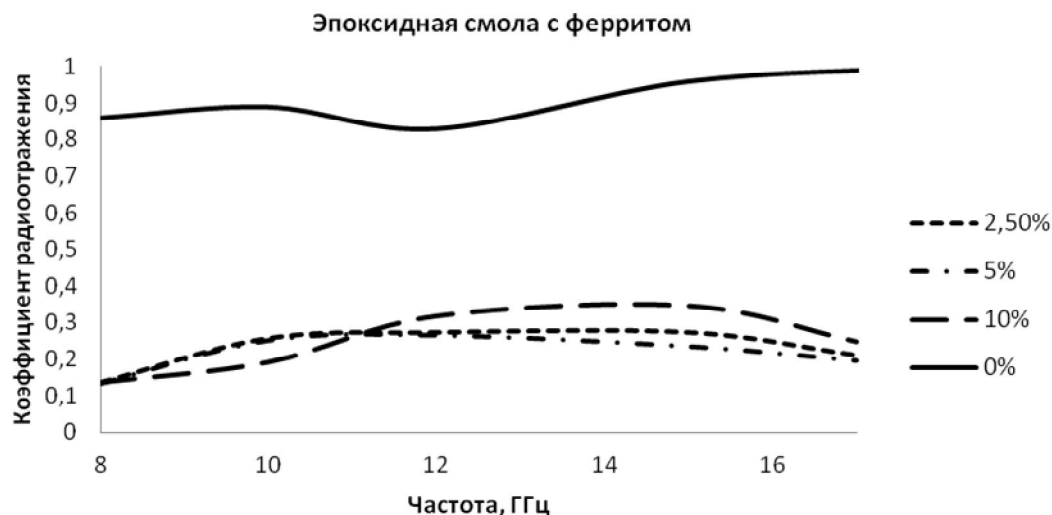


Рис. 2. Результаты измерений коэффициента отражения электромагнитной энергии для панелей, состоящих из эпоксидной смолы и марганец-цинкового феррита

Обычно ферритовый поглощающий слой располагается на проводящей поверхности, которая отражает падающую волну, поэтому отраженная от поверхности волна дважды проходит через поглощающий материал. На определенных частотах отраженная и падающая волны будут гасить друг друга, как в случае экрана Солсбери [4], поглощение будет эффективным. Отражающая способность в максимуме естественного ферромагнитного резонанса для ферритовых поглотителей, использующих подобный эффект, составляет 25–35 дБ (т.е. отражается менее 2 % падающей энергии) при толщине материала 5–8 мм, что составляет $\lambda/4$, требуемого для экрана Солсбери.

На величину коэффициента отражения падающей электромагнитной волны большое влияние оказывает порядок установки слоев радиопоглощающего материала. В подтверждение вышесказанного были проведены измерения коэффициента отражения падающей электромагнитной волны от пластин, состоящих из слоев карбида кремния (SiC) и нитрида алюминия (AlN). Измерения проводились в диапазоне частот 8–17 ГГц. Результаты измерений коэффициента отражения электромагнитной энергии на сверхвысоких частотах представлены на рис. 3.

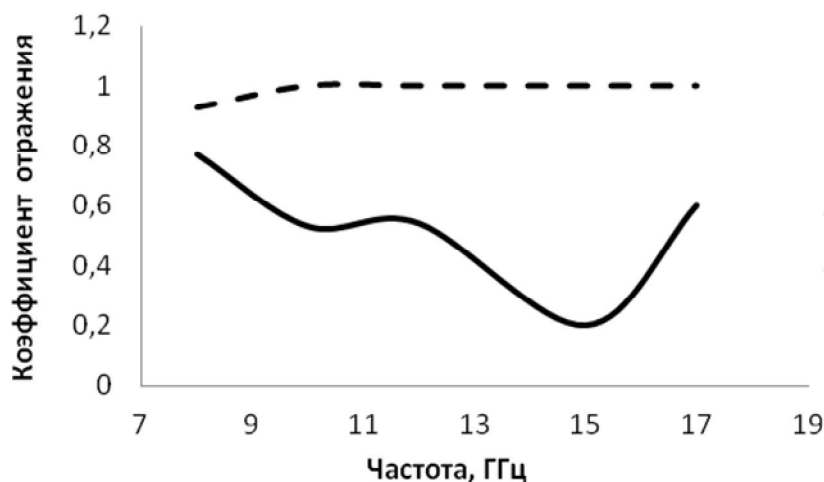


Рис. 3. Результаты измерений коэффициента отражения электромагнитной энергии для панелей из карбида кремния, нитрида алюминия

Из кривых зависимостей коэффициента отражения от частоты ЭМИ (см. рис. 3) видно, что нитрид алюминия во всем диапазоне сверхвысоких частот от 6 до 18 ГГц обладает высоким коэффициентом отражения, приблизительно равным единице, т.е. отражает все электромагнитные волны практически во всем диапазоне частот.

Зависимость коэффициента отражения карбида кремния от частоты ЭМИ имеет сложный характер. С увеличением частоты от 7 до 15 ГГц происходит уменьшение коэффициента отражения от 0,8 до 0,2 при наличии небольшого экстремума на частоте 12 ГГц. При дальнейшем увеличении частоты излучения коэффициент отражения начинает возрастать. Представленные выше результаты свидетельствуют, что радиопоглощение ЭМИ в значительной мере определяется природой радиопоглощающего материала.

Наряду с ролью природы РПМ важное воздействие на эффективность поглощения ЭМИ могут оказывать конструкционные особенности радиопоглощающей системы (изделия).

Для оценки влияния конструктивных особенностей радиопоглощающего изделия был изготовлен ряд образцов (панелей) с различным расположением бронерадиопоглощающих пластин. Многослойные панели размером 200×200 мм, состоящие из двух или трех слоев разной толщины карбида кремния и нитрида алюминия, представлены на рис. 4.

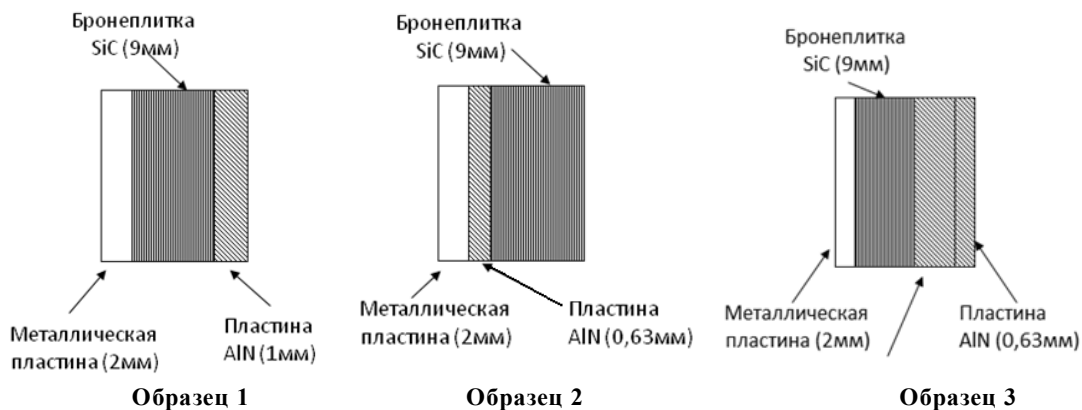


Рис. 4. Схема расположения пластин

Результаты измерений коэффициента отражения электромагнитной энергии на сверхвысоких частотах для многослойных панелей при различном сочетании пластин представлены на рис. 5.

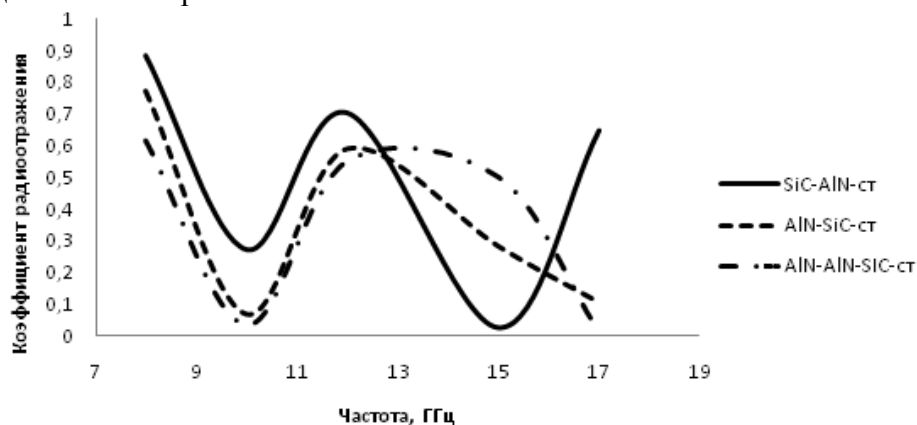


Рис. 5. Коэффициенты отражения электромагнитной энергии для панелей при различном сочетании пластин из карбида кремния и нитрида алюминия

Из рисунка видно, что кривые зависимостей коэффициента отражения от частоты излучения имеют сложный характер (в виде синусоиды) с минимумами коэффициентов отражения (0,03–0,27) на частотах 10 и 15 ГГц и максимумами (0,5–0,7) при частотах 8, 12, 17 ГГц.

В зависимости от расположения пластин в бронерадиопоглощающем изделии (БРПИ) наблюдаются следующие отличия в радиопоглощении:

– при расположении пластин карбида кремния и нитрида алюминия в образцах 1 и 3 (см. рис. 5) коэффициенты отражения меньше, чем у образца 2 в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц;

– в диапазоне частот от 12 до 18 ГГц имеет место обратная зависимость коэффициента отражения исследуемых пластин от порядка их расположения в изделии.

Были также изготовлены трехслойные панели, состоящие из последовательных пластин карбида кремния и нитрида алюминия, согласно схемам, представленным на рис. 6. Коэффициенты отражения электромагнитной энергии на сверхвысоких частотах представлены на рис. 7.

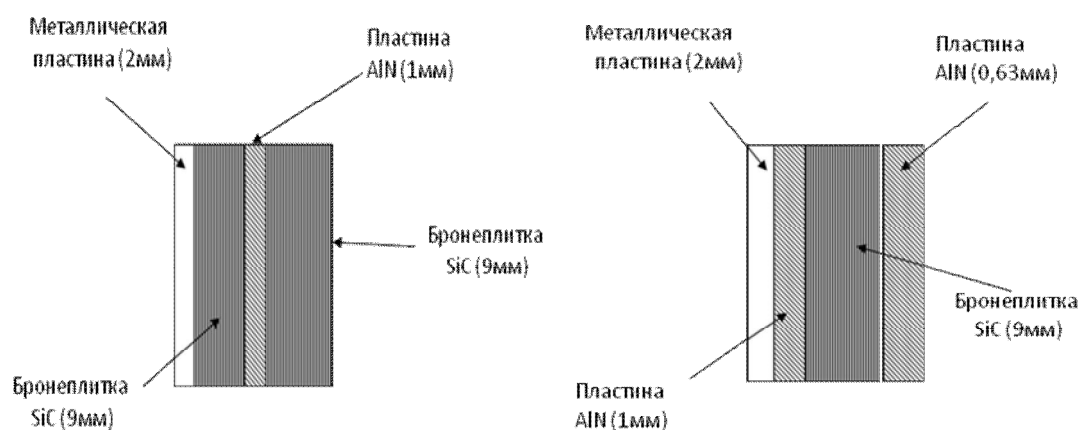


Рис. 6. Конструкции многослойных поглотителей размерами 200×200 мм, состоящих из последовательных пластин карбида кремния и нитрида алюминия

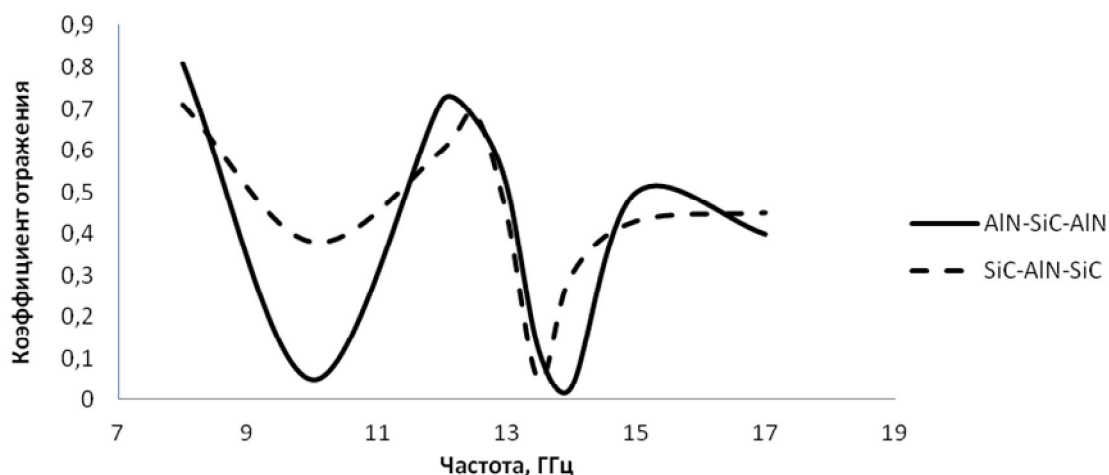


Рис. 7. Коэффициенты отражения электромагнитной энергии на сверхвысоких частотах для панелей, состоящих из пластин карбида кремния и нитрида алюминия

Как видно из рис. 7, для данных панелей на частоте 8–11 ГГц и 13–15 ГГц коэффициент отражения составляет 0–10 % (более 20дБ), это означает, что материал на этих частотах отражает 5–10 % электромагнитных волн, а на частоте 11–13 ГГц и 15–18 ГГц отражает до 70 %.

Для образца бронерадиопоглощающего изделия (БРПИ), состоящего из двух крайних пластин нитрида алюминия и промежуточного слоя карбида кремния, отмечается низкий коэффициент отражения в диапазоне от 8 до 12 ГГц по сравнению с образцом «обратного» расположения пластин.

Для перекрытия «провала» коэффициента отражения на частотах 11–13 ГГц в исследованных вариантах многослойных поглотителей был введен в конструкцию БРПИ дополнительный слой, состоящий из органической составляющей и феррита (рис. 8).

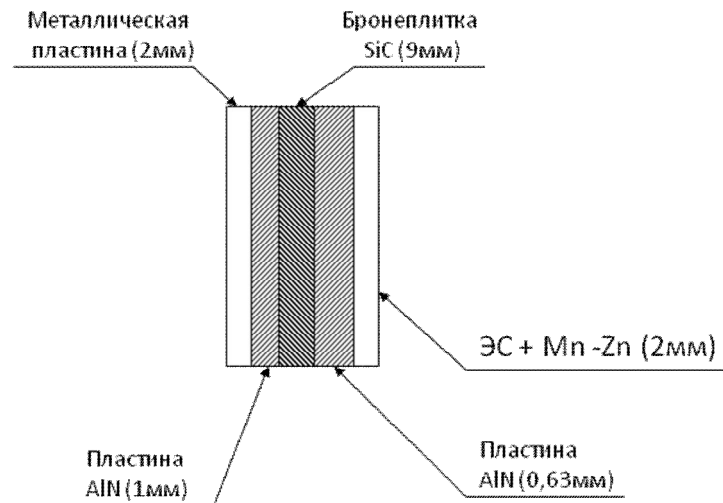


Рис. 8. Конструкция радиопоглощающего изделия с минимальным коэффициентом отражения

Значение коэффициента отражения такого изделия, представленного на рис. 9, составляет 0–20 % во всем исследованном диапазоне частот.

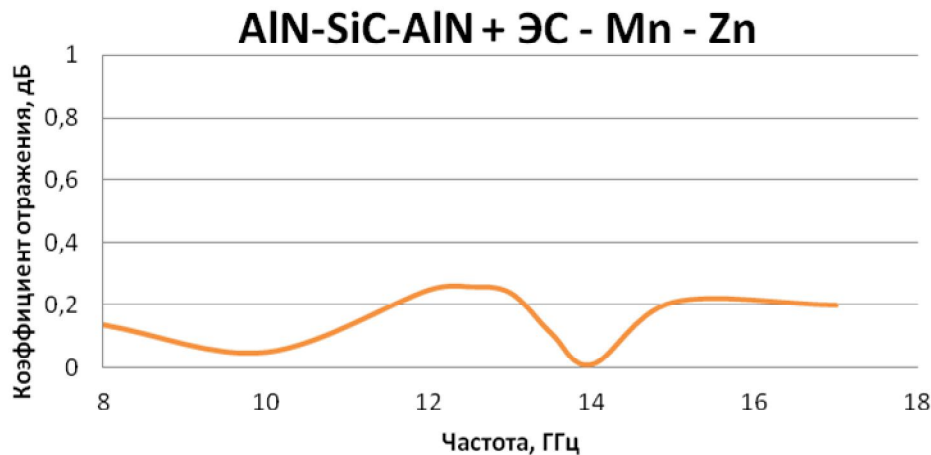


Рис. 9. Коэффициент отражения для панели, состоящей из последовательных слоев AlN-SiC-AlN + ЭС-Mn-Zn

Таким образом, как показали результаты экспериментов, при создании новых видов бронерадиопоглощающих изделий и совершенствовании технологических процессов их изготовления с учетом всей сложности влияния структурно-фазовых, физико-химических особенностей материала на его целевые свойства необходим обоснованный выбор бронерадиопоглощающих материалов (корунд, нитрид алюминия, карбид кремния, феррит и др.) и приемов закрепления, расположения их в изделии.

Варьируя свойства наполнителей и комбинируя ферромагнитные включения с включениями других типов, можно создать желаемый набор широкополосных радиопоглощающих изделий в СВЧ-области.

Библиографический список

1. Неорганическое материаловедение. Материалы и технологии: Энцикл. изд.: В 2 т. / Под ред. Г.Г. Гнесина, В.В. Скорохода. Киев: Наукова думка, 2008. Т. 2. Материалы и технологии. Кн. 1. А–О. 856 с.
2. Маликова Е.В., Непочатов Ю.К., Плетнев П.М., Богаев А.А., Соловьева А.А. Влияние добавок оксидов иттрия и магния на характеристики корундовой бронекерамики // Огнеупоры и техническая керамика. 2013. № 4–5. С. 35–39.
3. Шевченко В.Я. Введение в техническую керамику / Под ред. В.Я. Шевченко. М.: Наука, 1993. 112 с.
4. Шнейдерман Я.А. Новые радиопоглощающие материалы // Зарубежная радиоэлектроника. 1969. № 6. С. 101–124.

P.M. Pletnyov, Yu.K. Nepchatov, A.E. Bandin. Technological Aspects of Obtaining Armouring Radiowave-absorbing Ceramic Materials and Products. Requirements to armouring anti-radar materials are formulated, and the physical and technical properties of such materials are considered. Results of a study of the electromagnetic radiation reflection power of various radiowave-absorbing materials are reported. Various product designs are outlined.

Keywords: *armouring radiowave-absorbing materials, radiowave absorption factor, armouring elements, electromagnetic radiation, ferrites, alumina ceramics.*

Плетнев Петр Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Физика» СГУПС, член-корреспондент Сибирского отделения Академии наук высшей школы РФ, Российской академии естественных наук. Руководитель научного направления «Физика структурных дефектов и физико-химические основы получения функциональных керамических материалов». Область научных интересов: область регулирования микроструктуры и свойств оксидной керамики. E-mail: pletnevpm@stu.ru

Непочатов Юрий Кондратьевич – аспирант кафедры «Физика» СГУПС. Область научных интересов: современное материаловедение, технические керамические материалы.

Бандин Антон Евгеньевич – аспирант кафедры «Физическая и коллоидная химия» Алтайского государственного университета. Область научных интересов: современное материаловедение.