|  |  |
| --- | --- |
| *Описание: voenmeh* | МИНОБРНАУКИ РОССИИ  федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  высшего образования  **«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**  **(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»)** |
| БГТУ.СМК-Ф-4.2-К5-02 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Факультет |  |  |  | «Оружие и системы вооружения» |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Кафедра |  | 27.04.04 |  | «Управление в технических системах» |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Дисциплина |  |  | | |

Научно-исследовательская работа.

на тему

|  |
| --- |
| Анализ технологий снижения радиолокационной |
| заметности для РГ. |
|  |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил студент группы | | | |  | Е6М31 |
| Филиппов Александр Вячеславович | | | | | |
| Фамилия И.О. | | | | | |
| **РУКОВОДИТЕЛЬ** | | | | | |
| Митчин Н.А | |  |  | | |
| Фамилия И.О. Подпись | | | | | |
| Оценка |  | | | |  |
| «\_\_\_\_\_» |  | | | | 201\_г. |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2018 г.

Оглавление

[ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ 3](#_Toc535449933)

[ВВЕДЕНИЕ 4](#_Toc535449934)

1. [Способы уменьшения радиолокационной заметности. 4](#_Toc535449935)

[2. Виды РПМ 5](#_Toc535449936)

[3. Влияние составных частей материала на поглощение электромагнитных волн. 10](#_Toc535449937)

[4. Интерференционные покрытия и материалы 15](#_Toc535449938)

[5. Направления создания РПП и РПМ 17](#_Toc535449939)

[6. Теоретические основы создания РПМ 19](#_Toc535449940)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 21](#_Toc535449941)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 22](#_Toc535449942)

# ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

РГ - реактивная граната

РДГ- резонанс доменных границ

PJIC - радиолокационная станция

РПМ - радиопоглощающий материал

РПП- радиопоглощающие покрытия

# 

# ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из актуальных направлений в материаловедении является изготовление материалов для радиопоглощающих покрытий. Благодаря развитию данного направления, имеется широкое разнообразие перспективных радиопоглощающих искусственных материалов и покрытий. В настоящее время радиопоглощающие материалы имеют широкую область применения, и изготовление материалов для радиопоглощающих покрытий является одним из самых актуальных направлений в материаловедении. Радиопоглощающие покрытия являются перспективным средством снижения радиолокационной заметности объектов военной техники: самолетов, кораблей, ракет, наземного стационарного и мобильного оборудования. Также они могут быть использованы и в космической технике, для поглощения электромагнитного излучения в экранирующих устройствах, в поглощающих облицовках и корпусах, а также в безэховых измерительных камерах.

**Цель:** Провести анализ технологий снижения радиолокационной заметности для РГ.

**Задачи работы:**

1.Описать свойства поглощающих материалов.

2.Влияние составных частей материала на поглощение электромагнитных волн.

**Способы уменьшения радиолокационной заметности.**

Способом уменьшения радиолокационной заметности (РЛЗ) кораблей, летательных аппаратов, наземной техники и важнейших систем управления экономикой, командных пунктов и т. д., обеспечивающим снижение вероятности их поражения, помимо радикального изменения внешней формы объекта (архитектурная защита), являются:

* Использование в качестве основных конструкционных материалов неметаллических композитов, обеспечивающих создание легких и прочных конструкций, способных поглощать электромагнитное излучение в широком диапазоне частот с малым коэффициентом отражения радиоволн;
* Применение радиопоглощающих и многофункциональных покрытий, способствующих уменьшению уровня электромагнитных волн, отраженных от объектов, и снижающих их заметность при использовании инфракрасных, лазерных и других систем обнаружения и наведения.

Основными компонентами радиопоглощающих материалов (РПМ) и радиопоглощающих покрытий (РПП) являются полимерные (реже керамические) материалы которые обеспечивают необходимые диэлектрические свойства экранирующим и поглощающим электромагнитную энергию материалам, магнитодиэлектрические полимерные композиции на основе полимерных связующих, токопроводящих и магнитных компонентов (наполнителей, обеспечивающих необходимые магнитные свойства).

# 2. Виды РПМ

Универсальной классификации радиопоглощающих материалов не существует. Условно их можно классифицировать по составу и принципу действия.

В современных разработках РПМ для поглощения энергии электромагнитных волн используются в основном традиционные электропроводящие дисперсные (сажи, графит, металлические частицы), волокнистые (углеродные, металлические, металлизированные полимерные) и магнитные (спечённые ферритовые пластины, порошки ферритов, карбонильное железо и др.) наполнители, применяемые как по отдельности, так и совместно, образуя сложные композиционные структуры.

Радиопоглощающие материалы, изготовленные в виде лаков, красок, герметиков, полимеров, тканей, плиток, пеномасс, наполненных резин, строительных плит, сыпучих смесей и в других вариантах различных композиций, являются основными компонентами при создании поглотителей электромагнитных волн, которые используются для оборудования безэховых камер.

По принципу действия выделяют несколько больших групп радиопоглощающих материалов [1]:

* резонансные;
* нерезонансные магнитные;
* металлические экраны;
* нерезонансные объёмные;
* пирамидальные поглотители электромагнитных волн.

*Резонансными РПМ* обеспечивается частичная нейтрализация отраженного от поверхности поглотителя излучения, часть которого прошла по толщине материала. Эффект нейтрализации значителен при толщине поглотителя, равной одной четверти длины волны излучения. В этом случае, отраженные поверхностью поглотителя волны находятся в противофазе. Резонансные материалы наносятся на отражающие поверхности объекта маскировки. Толщина РПМ соответствует четверти длины волны излучения РЛС.

Падающая энергия высокочастотного излучения отражается от внешней и внутренней поверхностей РПМ с образованием интерференционной картины нейтрализации исходной волны. В результате происходит подавление падающего излучения. Отклонение ожидаемой частоты излучения от расчётной приводит к ухудшению характеристик поглощения, что делает этот материал узкополосным. Поэтому данный тип РПМ эффективен при маскировке от излучения РЛС, работающей на стандартной, неизменяемой моночастоте.

*Нерезонансные магнитные РПМ* содержат частицы феррита, распределенные в эпоксидном пластике или в покрытии.

Применяют несколько типов ферритов:

* никелевые ферриты используются в основном в диапазонах мили - и сантиметровых волн, имеют большие значения намагниченности при насыщении и высокую термостабильность. Их недостаток - высокое значение начальных потерь;
* магнитные ферриты применяются в средней части сантиметрового диапазона; обладают малыми магнитными и диэлектрическими потерями, но меньшей термостабильностью по сравнению с ферритами из никеля;
* магниевые ферриты используются в длинноволновой части диапазона СВЧ. Они обладают малыми значениями индукции при насыщении. Как и у магнитных ферритов, главным недостатком является низкая термоустойчивость.

Преимуществом ферритовых РПМ является их маленькая толщина (несколько миллиметров) и высокая гибкость материала. Недостатком же являются низкая технологичность изготовления и нагрев, возникающий в результате рассеивания энергии высокочастотного излучения по большой поверхности.

Получение широкополосности материала достигается путём использованием ферритов с различными резонансными частотами. Зависимость резонансной частоты зависят не только от материала (никелевый, магнитный, магниевый), но и от размера частиц порошка (таблица 1, таблица 2)

Таблица 1 - Зависимость частоты поглощения от размера ферритовых частиц μ >300.

Размеры частиц порошка, мкм Эффективная поглощающая частота, ГГц

1650-701 0,5-1,5

701-351 1 - 2

351-104 1,8-3

104-43 2,5-7,5

<43 6-12

Таблица 2 - Зависимость частоты поглощения от размера ферритовых частиц μ <300.

Размеры частиц порошка, мм Эффективная поглощающая частота, ГГц

1650-701 1-3

701-351 2-4

351-104 4-6

104-43 5-7,5

<43 6-12

РПМ служат для уменьшения отражений радиоволн внутри помещений, испытательных камер и т.д. Изготавливаются РПМ в виде тонких резиновых ковриков, гибких или жестких листов из поролона или древесных волокон, пропитанных соответствующими составами. В таблице 3 приведены характеристики некоторых РПМ.

Таблица 3 - Характеристики некоторых РПМ

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Материал | Марка | Диапазон волн, см | Коэф-т отражения, % |
| Резиновые коврики | В2Ф-2 В2Ф-3 ВКФ-1 | 0,8 - 4 |  |
| Магнитодиэлектрические пластины | ХВ-0,8 ХВ-2,0 ХВ-3,2 ХВ-10,6 | 0,8 2,0 3,2 10,6 |  |
| Поролоновые поглощающие покрытия | "Болото" | 0,8 и более 3,0 и более | 2 -3 2 -3 |
| Древесные поглощающие покрытия | "Луч" | 15 - 150 | 1 -3 |
| Ферритовые пластины | СВЧ-0,68 | 15 - 200 | 3 -4 |

*Токопроводящие краски* созданы на основе диэлектрического пленкообразующего материала с добавлением токопроводящих мелкодисперсных пигментов (графит, сажа, коллоидное серебро, окиси металлов, порошковая медь или алюминий). Наиболее технологичен способ изготовления экрана - нанесение краски на основе сажи или графита на любую основу, причем экран может быть по форме и конструкции достаточно сложным.

Эффективная токопроводящая краска поучается на основе композиции лака 9-32 (ТУ МХП-3219-52) и 30%-ного карандашного графита марки КТБ (ГОСТ 4404-58).

*Металлические экраны* - плоские одно - или многослойные пластины, экранирующие электромагнитное излучение. Металлические экраны при практически приемлемой толщине обеспечивают хорошую эффективность экранирования на всех частотах радиодиапазона. Эффективность увеличивается с ростом частоты, магнитной проницаемости μ, проводимости σ и толщины экрана d.

С уменьшением частоты коэффициент затухания в металле уменьшается, а эффективность экранирование за счёт поглощения падает, поэтому экран, состоящий из нескольких тонких слоёв различных металлов, обладает в низкочастотной области большим экранирующим действием по сравнению с однородным экраном за счёт увеличения числа отражений. В таблице 4 приведены металлические материалы и их электрофизические

характеристики.

Таблица 4. Металлические материалы и их электрофизические

характеристики

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Металл | Удельное сопротивление ρ, Ом∙мм2/м | Удельная проводимость σ, 104(1/Ом∙м) | Относительная магнитная проницаемость μ |
| Медь (Cu) | 0,0175 |  |  |
| Алюминий (Al) | 0,03 | 33,3 |  |
| Латунь | 0,075 | 13,3 |  |
| Цинк (Zn) | 0,06 | 16,7 |  |
| Сталь | 0,1-0,13 |  | 50-100 |
| Пермаллой | 0,67 | 1,5 |  |
| Олово (Sn) | 0,12 | 8,35 |  |
| Серебро (Ag) | 0,016 |  |  |
| Бронза | 0,021 |  |  |
| Никель (Ni) | 0,07 |  |  |
| Свинец (Pb) | 0,21 | 4,76 |  |
| Нихром |  |  |  |

Недостатком металлических экранов можно назвать обеспечение хорошего уровня поглощения лишь при нормальном угле падения ЭМВ на поверхности. При изменении угла падения ЭМВ, коэффициент поглощения уменьшается.

*Нерезонансные объёмные РПМ* - обычно используются в виде относительно толстых слоев, поглощающих большую часть подводимой энергии до подхода и возможного отражения волны от металлической задней пластины. Принцип работы основан на использовании как диэлектрических, так и магнитных потерь, последнее - за счет добавления соединений феррита. В некоторых случаях используется введение графита в пенополиуретановую матрицу. Этот тип РПМ не только технологически сложен в изготовлении, но и занимает большие объёмы. Неоспоримыми преимуществами такого материала являются высокая поглощающая способность и широкополосность поглощения.

*Пирамидальные поглотители электромагнитных волн* (Рисунок 1) - это пирамидальные контейнеры, заполненные радиопоглощающим материалом на основе углерода, благодаря чему достигается стабильность радиотехнических и эксплуатационных характеристик поглотителя. Их недостатком является плохая эргономика и большие объёмы, что затрудняет использование РПП при малых объёмах помещения. Так же пирамидальные поглотители, выполненные из полиуретана, не термостойки. Поэтому их использование, при поглощении электромагнитной волны большой мощности, связано с определенным риском нагрева и возгорания. Полиуретан легко абсорбирует влагу, что приводит к изменениям его характеристик.

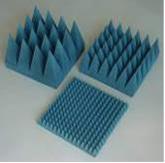


Рис. 1. Пирамидальный поглотитель.

# 3.Влияние составных частей материала на поглощение электромагнитных волн.

Рассмотрим процесс отражения электромагнитной волны от бесконечной идеально проводящей поверхности, покрытой радиопоглощающим веществом (рис. 2). [2]

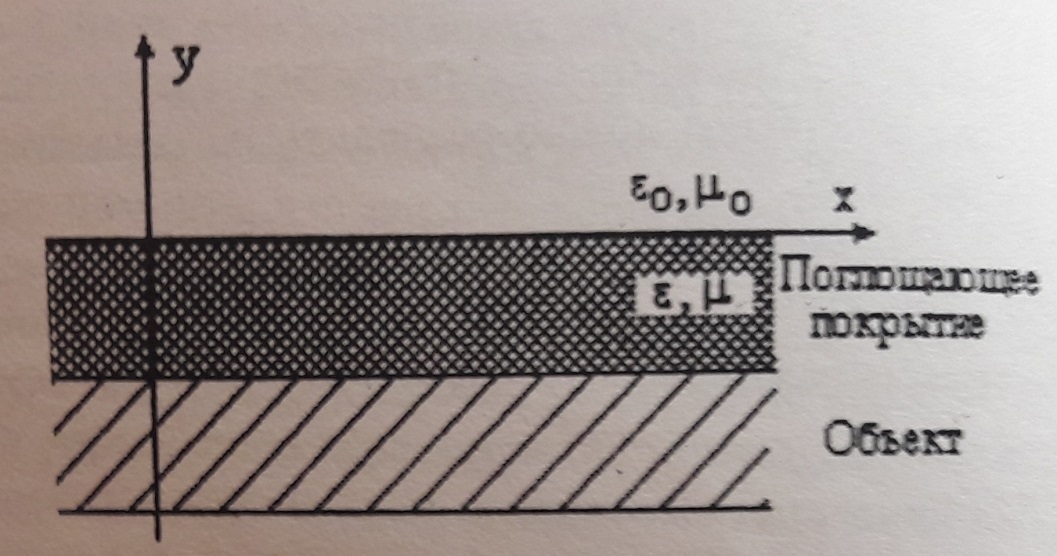


Рис 2. Схема радиопоглощающего материала

Комплексный коэффициент от плоской границы раздела двух сред зависит от различия волновых сопротивлений сред

Где -волновое сопротивление пространства

-волновое сопротивление поглощающего покрытия

и - комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемость материала покрытия соответственно

Можно получить

,

Учитывая, что

где n- коэффициент преломления среды, а k- коэффициент затухания, соотношение можно преобразовать:

Из соотношения видно, что коэффициент отражения от границы двух сред (у = 0) равен нулю при или с учетом формулы условия полного поглощения принимают вид

Условиям удовлетворяют покрытия, в состав которых входят вещества с достаточно большими потерями (например, ферромагнетики). Структуру таких покрытий образуют частицы ферромагнетика, сцементированные изоляционным материалом из немагнитного диэлектрика. Однослойные покрытия этого типа достаточно эффективны в диапазоне метровых и дециметровых волн. Эффективность действия покрытия повышается, если оно неоднородно и его коэффициент поглощения постепенно увеличивается от наружной поверхности покрытия к поверхности защищаемого объекта.

Для поглощения волн сантиметрового диапазона используют многослойные покрытия с параметрами, изменяющимися от слоя к слою таким образом, что проницаемость е возрастает от наружной поверхности вглубь. Каждый слой таких покрытий изготовляется из пенополистирола или каучука, а поглотителем служит углерод (графит или сажа). Концентрация поглотителя от слоя к слою меняется. Для согласования и покрытия с внешним (свободным) пространством относительная диэлектричекая проницаемость должна равняться единице, т. е. ,а мнимая составляющая (тангенс угла диэлектрических потерь) должна быть близкой к нулю. Резкое изменение параметров и от слоя к слою недопустимо, поскольку это приводит к увеличению коэффициента отражения от границы раздела двух слоев.

Для уменьшения остаточного отражения широко применяют покрытия, наружная поверхность которых представляет собой рельефную геометрическую неоднородность, состоящую из периодически повторяющихся неровностей в виде, пирамидальных или конических шипов рис. 3.

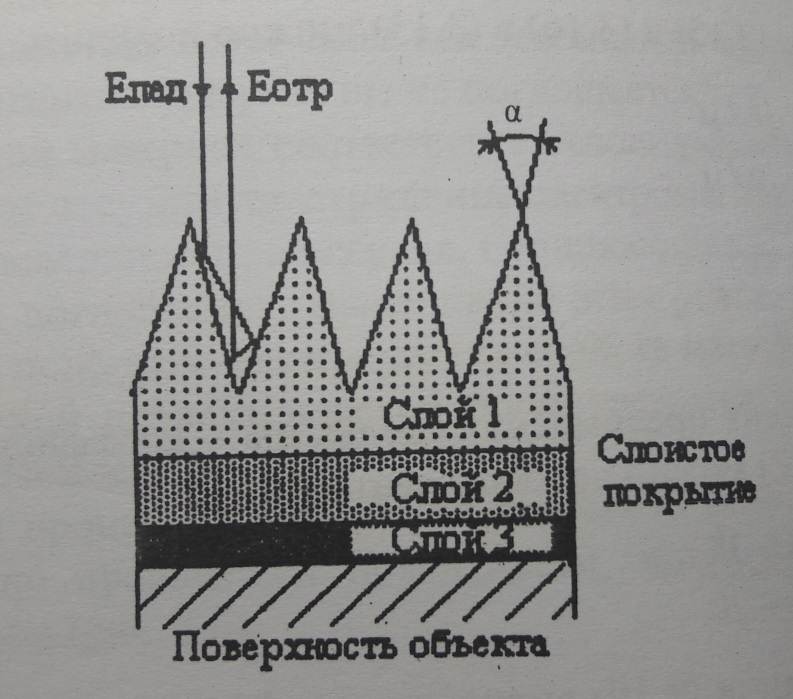


Рис.3 Многослойный шиповидный РПМ

Чтобы увеличить число отражений между шипами и, следовательно, снизить отражение от поверхности покрытия, угол при вершине α выгодно делать небольшим.

Строгий расчет шиповидных (пирамидальных) РПМ привела, работе, там этот материал рассматривается как РПМ рассеивают типа. Принцип его действия связан с многократным перетрачу ЭМВ от поверхностей пирамид (при каждом переотражении происходит поглощение энергии ЭМВ и изменение направления движения воны). [2]

Рассмотрим механизм согласования шиповидных РПМ в коротковолновой части диапазона волн. Пусть поверхность пирамидального материала покрыта плоским радиопоглощающим материалом, чем обеспечивается отсутствие поля внутри пирамид и «зеркальный» характер отражения от поверхности граней пирамид (рис. 4). И пусть, как показано на рис. 6, плоская волна падает на пирамидальный материал под углом θ к нормали его основания. Каждые две рядом стоящие пирамиды образуют клиновидную поглощающую полость с углом при вершине α.

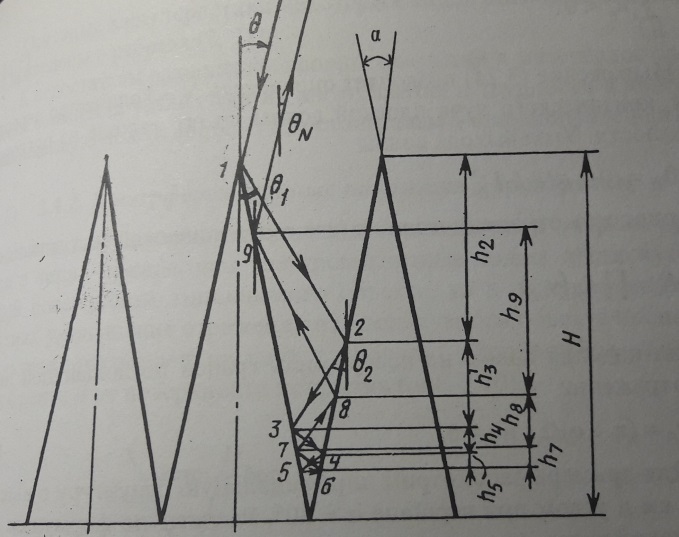


Рис. 4 Пирамидальный РПМ рассеивающего типа: угол падения волны при i-ом переотражении между пирамидами; угол выхода волны после N переотражений; углубление луча в полость при i-отображении.

В результате N последовательных отражений плоская волна углубляется в полость, а затем выходит из нее, теряя при каждом отражении интенсивность.

Рассмотрим геометрию переотражений в поглощающей полости. Выделим критический луч, претерпевший наименьшее количество переотражений. Это луч, точка первого отражения которого лежит в плоскости вершин материала (). Углубление в поглощающую полость точки второго отражения относительно точки первого отражения

где H- высота поглощения пирамиды;

- угол между отраженным после первого отражения лучом и осью пирамиды.

Аналогично вертикальное перемещение в полости точки n отражения будет

где

Условие выхода волны из поглощающей полости после отражений

Выражение (3.24) позволяет определить *N* – количество переотражений критического луча плоской волны до его выхода из поглощающей полости. Угол выхода волны

Интенсивность отраженного поля (его геометрической составляющей)

где угол падения волны на поверхность граней поглощающей полости при *п* отражении

Для примера рассмотрим пирамидальную структуру с высотой H = 30 см и углом при вершине α = 30°. Расчеты по формулам показывают, что при углах прихода волны в поглощающих плоскостях критический луч претерпевает ; и переотражений. При этом число переотражений, при которых материал полости мало отражает (угол падения ), будет соответственно ; и .

Если материал поглощающей полости обеспечивает при однократном отражении в диапазоне углов падения ослабление дБ, то даже при трехкратном отражении в полости плоская ЭМВ при выходе из щитовидного РПМ окажется ослабленной на -50 дБ.

Очень важным параметром РПМ является диапазон рабочих частот , в пределах которого не превышает заданного уровня.

Как известно, радиопоглощающие материалы являются широкодиапазонными. На рис. 5 показана зависимость от длины волны облучающих колебаний для покрытия на основе пенополистирола типа AF- 20, разработанного одной из английских фирм.

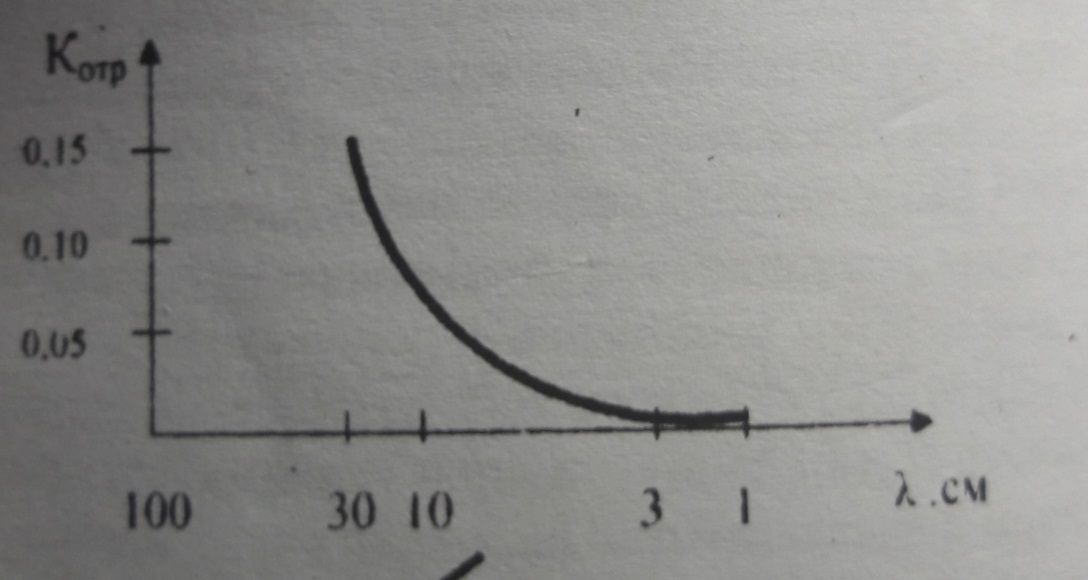


Рис. 5 Зависимость от длины волны

К недостаткам радиопоглощающих покрытий и материалов следует отнести сложность технологии их изготовления и трудности в нанесении на защищаемую поверхность. А к достоинствам - широкополосность.

# 4. Интерференционные покрытия и материалы

Если в поглощающих покрытиях большая часть энергии превра­щается в тепло прежде, чем электромагнитные волны достигнут отра­жающей поверхности защищаемого объекта, то в интерференционных покрытиях уменьшение отражения от маскируемого объекта происходит в результате интерференции двух радиоволн: отразившейся от поверхности объекта и от поверхности покрытия (рис.6). [2]

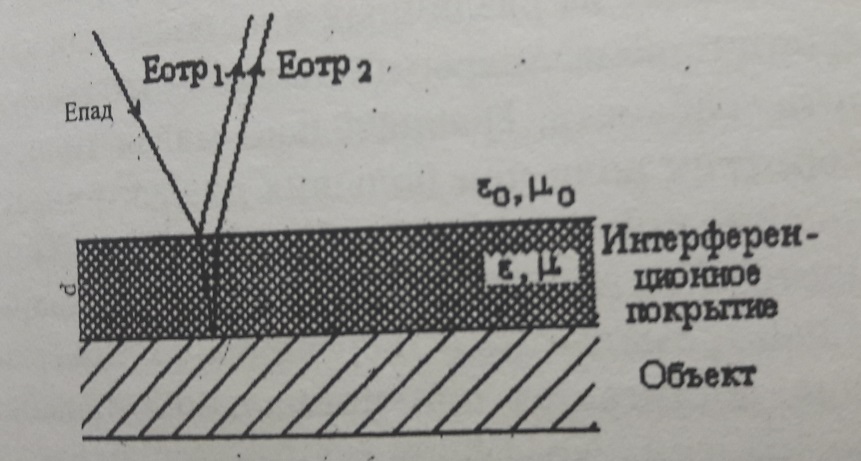


Рис. 6 Схема интерференционного покрытия

Естественно, что при этом расстояние между отражающими поверхностями (толщина покрытия) должно быть таким, чтобы обеспечивалось сложение отраженных радиоволн в противофазе.

Отсутствие отражения от интерференционного покрытия достигался при условии

- составляющая отраженной волны от границы раздела «свободное пространство-покрытие».

Суммарное отраженное поле в направлении источника падающей волны равно нулю, если выполняются условия

где коэффициент затухания волны за одно прохождение поглощающего покрытия в прямом и в обратном направлениях;

-модуль коэффициента отражения покрытия;

d — общая толщина, покрытия;

- длина волны в веществе покрытия с параметрами и .

где — резонансная длина волны.

обеспечивает противофазность ЭМВ, а условие- равноамплитудность этих волн. Следовательно, интерференционное покрытие должно обладать определенной толщиной и быть поглощающим. Но в отличие от РПМ, этот эффект здесь не является основным.

Чтобы интерференционное покрытие обладало поглощающими | свойствами, в его состав вводят ферромагнетики с примесями сажи или порошка графита в качестве поглотителя. Интерференционные защитные покрытая изготовляют из различных пластмасс или каучука. Достоинством интерференционных покрытий является их значительная механическая прочность, гибкость, сравнительно малая толщина и небольшая масса. Для коротких волн при больших диэлектрических и магнитных потерях в веществе покрытия могут быть очень тонкими.

Эффективность действия интерференционных покрытий зависит от угла падения электромагнитной энергии на их поверхность. Минимальное отражение достигается при нормальном падении радиоволн. При других углах падения коэффициент отражения резко возрастает. Таким образом, покрытие интерференционного типа представляет собой резонансный поглотитель, состоящий из слоя диэлектрика, наложенного на защищаемый металл. Толщина слоя диэлектрика, его диэлектрическая постоянная и тангенс угла диэлектрических потерь могут быть выбраны такими, что коэффициент отражения на некоторой, наиболее вероятной волне, был равен нулю. При этом наибольшее отклонение частоты падающей волны от резонансной частоты поглощаемого излучения не должно превышать ± 5%. Иначе значительно понижается эффективность поглощения энергии падающего электромагнитного поля.

Интерференционные покрытия менее габаритны, чем поглощающие. Однако, как следует из их принципа действия, они и более узкополосны, что зачастую ограничивает возможности их применения. Поэтому наиболее перспективными являются комбинированные многослойные покрытия.

Поглощающая способность многослойных интерференционна покрытий и их диапазонность существенно зависят от количества толщины слоев, а также от электрических параметров используемых материалов. При соответствующем подборе значений проводимости и электрической проницаемости можно считать, что каждый слой согласован с колебаниями в узкой полосе около одной частоты, а несколько слоев обеспечивают малое значение коэффициента отражения в диапазоне. Для иллюстрации этого утверждения на рис. 7 приведены зависимости коэффициента отражения для интерференционных покрытий с многослойными структурами из чередующихся диэлектрических слоев.

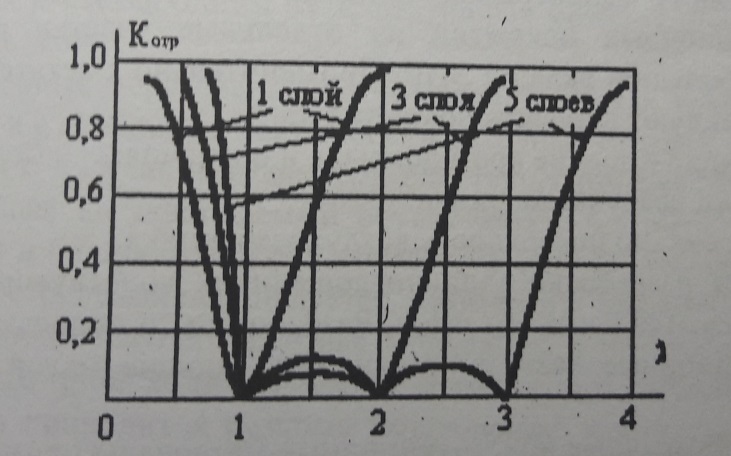


Рис. 7 Частотная зависимость многослойного интерференционного покрытия

# 5. Направления создания РПП и РПМ

В настоящее время можно выделить следующие тенденции увеличения поглощения электромагнитной энергии РПМ и РПП:

1. За счет увеличения мнимой части диэлектрической проницаемости ε" и диэлектрических потерь материала. Однако увеличение проводимости и, соответственно, тепловых потерь приводит к увеличению отражения от передней поверхности материала. С целью снижения заметности целесообразно использовать интерференционные явления. При определенной толщине РПП волны, отраженные от передней и задней поверхностей РПП, будут находиться в противофазе, что означает зависимость толщины поглощающего слоя от частоты. Следовательно, приемлемых значений коэффициента поглощения можно добиться лишь на некоторых фиксированных частотах.

2. За счет увеличения мнимой части магнитной проницаемости μ" и магнитных потерь. Магнитные наполнители, обеспечивающие большие магнитные потери, вводят в состав композиционных материалов и аморфных сплавов, предназначенных для экранирования и поглощения электромагнитной энергии. С целью подавления электромагнитных помех в электрических цепях, в источниках вторичного электропитания широко используют ферритовые фильтры и чип-бусины[3]. Ферри́товый фильтр – пассивный электрический компонент, изготовленный из ферритового материала в виде кольца, использующийся в качестве фильтра, для подавления высокочастотных помех в электрических цепях. Ферритовое кольцо увеличивает индуктивность проходящего через него участка провода в несколько сотен (вплоть до тысяч) раз, что обеспечивает высокий импеданс и подавление помех высокой частоты. Чаще всего имеют форму цилиндров или параллелепипедов; могут быть съемными с защелками или несъемными литыми. Ферритовые фильтры используются как дополнительные внешние фильтры, как правило, для устройств, имеющих длинные соединительные кабели.

3. За счет согласования волновых сопротивлений материала покрытия со средой распространения электромагнитной волны. Для снижения уровня сигнала, отраженного от границы раздела и обусловленного скачком волнового сопротивления, используют многослойные материалы, первый слой которых обладает меньшим значением диэлектрической проницаемости, следовательно, меньшим отражением от границы раздела. Предельным случаем являются материалы градиентного типа, характеристики которых изменяются непрерывно по мере продвижения вглубь материала. С этой целью используют конструкции в виде пирамид или усеченных конусов, обеспечивающих плавное изменение электрических характеристик вдоль распространения волны.

Недостатком вышеперечисленных конструкций являются сложность изготовления и необходимость использования РПМ толщиной порядка длины волны в материале, что становится критичным для задач снижения отражений в области частот ниже 1 ГГц, особенно при ограничении на общие габаритные характеристики. Кроме того, для материалов такого типа нередко необходима пропитка, обеспечивающая пожарную безопасность.

Паразитное отражение от границы раздела из-за рассогласования волновых сопротивлений можно подавить путем введения в материал компонента с отличной от нуля мнимой частью магнитной проницаемости μ". И наряду с электропроводящими наполнителями при создании РПМ и РПП используются порошковые наполнители магнитной природы (порошки ферритов, карбонильное железо и т.д.) В ряде работ предлагают использование композиционных материалов, содержащих в диэлектрической матрице (вспененная полимерная композиция) фракцию проводящего наполнителя в форме протяженных включений (например, углеродных или металлических волокон) совместно с мелкодисперсными электропроводящими и магнитными порошками.

Применение ферритовых наполнителей в радиопоглощающих материалах перспективно, так как материал имеет значительные магнитные потери, и наличие больших значений магнитной проницаемости μ" позволяет обеспечить лучшее согласование металлических и сильно поглощающих слоев со свободным пространством.

Значительное число публикаций в России и за рубежом посвящено созданию новых форм ферритовых наполнителей и совместному использованию ферритовых порошков, графитов, металлических волокон. Так, в предложен РПМ, который содержит в качестве полимерного связующего синтетический клей на основе латекса, в качестве магнитного наполнителя – порошкообразный феррит или карбонильное железо.

4. За счет интерференции отражений от разных слоев покрытия, приводящей к уменьшению отражения от материала (многослойные покрытия и покрытия специальной формы). Здесь комплексное волновое сопротивление также уменьшается по мере погружения вглубь покрытия. Это позволяет избежать резких скачков волнового сопротивления и, следовательно, нежелательных отражений. Наиболее простым вариантом такой структуры является двухслойное покрытие из материала с разной проводимостью, где верхний слой с меньшими значениями электрической проводимости часто называют согласующим, а нижний (с большими значениями) – поглощающим.

5. За счет интерференционного минимума волн, отраженных от поверхностей ферритового РПП и металлического экрана, на который наклеены пластины покрытия. При этом толщина покрытия определяется длиной волны падающего излучения. Увеличение магнитной и диэлектрической проницаемостей снижает длину электромагнитной волны и позволяет уменьшить толщину пластин, что особенно важно при низких частотах [4]. Коэффициент ослабления отраженного электромагнитного излучения в значительной степени зависит не только от интерференционных явлений при отражении электромагнитных волн, а также от процессов поглощения электромагнитного излучения в результате резонансных явлений.

# 6. Теоретические основы создания РПМ

Под поглощением электромагнитной энергии понимают электрические и магнитные потери в материале, происходящие за счет процессов релаксации. Энергия, переданная системе, распределится между собственными типами колебаний, амплитуды которых примут значения, соответствующие термодинамическому равновесию. Процессы релаксации будут определять скорость убывания амплитуд колебаний, возбужденных внешними силами. Если система находится под действием периодических внешних сил, то процессы релаксации осуществляют непрерывный отток энергии от первичных типов колебаний и обеспечивают тем самым возможность непрерывного поглощения системой энергии внешних сил. Процессы релаксации в этом случае определяют диссипативные характеристики системы. В [5] приведены математические модели спин-спиновой, спин-решеточной, ионной релаксации, релаксации с участием носителей тока в зависимости от частиц, участвующих в процессе перераспределения энергии. Выделение нескольких типов релаксации условно, так как все частицы связаны силами взаимодействия и одновременно участвуют в процессе перераспределения энергии, однако такое разделение возникло из-за сложности цельного описания процесса релаксации в поликристаллическом материале. Наиболее сильное поглощение энергии связывают с резонансными явлениями в ферритах.

Наибольший интерес представляет резонанс доменных границ (РДГ) и естественный ферромагнитный резонанс (ЕФМР), которые описываются уравнениями Деринга и Ландау – Лифшица соответственно. Известные уравнения практически постулированы, но для решения практических задач пользуются уравнениями, полученными эмпирическим путем.

Установлено, что процессы смещения доменных границ оказывают решающее влияние на многие физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов. Нелинейные процессы динамического преобразования намагниченности в системе спинов, локализованной в доменной стенке, определяют способы диссипации энергии, подведенной к доменной границе извне [5].

Известно [6], что магнитные потери ферритовых РПМ в интервале частот 10–100 МГЦ в значительной степени вызваны процессами резонанса доменных границ (РДГ), приводящими к оттоку внешней электромагнитной энергии благодаря перераспределению энергии между электронами, образующими доменные границы.

Рассеяние электромагнитной энергии происходит на доменных границах [7], часть которых приходится на межзеренные границы. Поэтому на величину электромагнитных потерь влияют не только микропоры, инородные примеси и легирующие добавки, но характер их распределения в материале. Чем массивнее и продолжительнее доменные границы, чем больше содержат микропор, включений инородных атомов, тем эффективнее будет происходить рассеяние падающей электромагнитной волны. Так, при добавлении в Mg-Zn ферритовый материал оксида меди в качестве эвтектики (облегчающей спекания) CuO можно наблюдать включения в форме микроглобул, расположеных в микропорах. Тогда как оксид висмута Bi2O3 растекается по границам зерен, занимая большую поверхность, и падающая электромагнитная волна рассеивается на большей площади. Видимо, именно этим можно объяснить, что при одинаковом размере зерна Mg-Zn ферритового материала потери электромагнитной энергии в случае использования оксида висмута больше, чем в случае использования оксида меди [8].

Можно предположить, что средства электронной микроскопии, использованной при анализе ферритовых радиопоглощающих материалов, помогут экспериментальным путем установить все особенности микроструктуры, при которых материал будет наиболее эффективен с точки зрения поглощения электромагнитной энергии.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ современного состояния вопроса в области получения поглотителей ЭМВ из композиционного материала указывает, что данной области науки и техники перспективным является направление, связанное с комплексным решения задачи создания полимерных композиционных материалов с необходимыми функциональными (поглощение ЭМИ) и технологическими свойствами. На основании проведенного анализа современного состояния вопроса в области создания изделий, поглощающих ЭМВ, показано, что одним из наиболее перспективных направлений является использование ПКМ, сочетающих магнитные и диэлектрические свойства (магнитодиэлектриков).

# 

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Богущ В.А., Борботько Т.В., Гусинский А.В. и др. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты. / Мн.: Бестпринт, 2003г, 173с.
2. 2.В.В. Смирнов, С.В. Николаев.  Пассивные помехи.  Издательство "Радиоавионика", 2008.-400c
3. Подавление помех с помощью фильтров EMIFIL. Руководство по применению. Руководство пользователя. – М. : Додэка XXI, 2014. – 56 с.
4. Menshova, S. B. The Influence of Basic Composition and Microstructures on the Properties of Ni-Zn Ferrite RadioAbsorbing Materials / S. B. Menshova, V. G. Andreev, A. N. Klimov, R. M. Vergazov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2015. – Vol. 393. – P. 569–573.
5. Гуревич, А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках / А. Г. Гуревич. – М. : Наука, 1973. – 573 с.
6. Smit J. Ferrites / J. Smit, H. P. J. Wijn. – N. Y. : John Wiley, 1959. – P. 290.
7. Бибиков, С. Б. Влияние параметров микроструктуры на радиофизические характеристики Ni-Zn ферритовых материалов / С. Б. Бибиков, С. Б. Меньшова, М. В. Прокофьев, Р. М. Вергазов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 3 (15). – С. 123–135.
8. Исследование влияния легирующих добавок на микроструктуру и свойства радиопоглощающих Mg-Zn ферритовых материалов / В. Г. Андреев, С. Б. Меньшова, А. Ю. Кирина, С. Б. Бибиков, М. В. Прокофьев, В. М. Прохоров // Российские нанотехнологии. – 2016. – Т. 11, № 9–10. – C. 22–28.