

УДК 620.197

МНОГОСЛОЙНЫЙ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЙ НЕТКАНЫЙ МАТЕРИАЛ*А. В. Дедов**, *В. Г. Назаров*

Московский госуниверситет печати им. И. Федорова, г. Москва, Россия

Исследованы электрофизические свойства многослойных радиопоглощающих материалов, полученных сложением нетканых полотен из диэлектрических волокон с промежуточным слоем из электропроводящих углеродных волокон. При варьировании содержания углеродных волокон созданы многослойные материалы, поглощающие электромагнитное излучение в широком диапазоне частот. Рассмотрен зависящий от содержания углеродных волокон механизм поглощения излучения полотнами и многослойными материалами.

Обеспечение электромагнитной совместимости электротехнических, электронных и радиоэлектронных систем является важной практической задачей. Её решение возможно с помощью радиопоглощающих материалов. Кроме высокой способности поглощать электромагнитное излучение в широком диапазоне частот, такие материалы должны обладать рядом определённых свойств, прежде всего небольшой плотностью, стойкостью к внешним воздействиям и длительным сроком эксплуатации.

Такие свойства характерны для нетканых радиопоглощающих материалов (НРПМ), представляющих собой матрицу из диэлектрических волокон, которая наполнена проводящими волокнами, чаще всего углеродными (УВ) [1, 2]. Основной проблемой получения качественных НРПМ является равномерное смешение (объёмное распределение) диэлектрических и проводящих волокон, при этом массовое содержание последних обычно не превышает 10 %. Существующее оборудование не обеспечивает требуемое качество смешения волокон, необходимое для получения НРПМ с заданными электрофизическими свойствами.

Можно выделить три основных подхода к решению проблемы равномерного смешения диэлектрических и проводящих волокон. Первый подход основан на увеличении электрического сопротивления проводящих волокон, что позволяет повысить их содержание в составе НРПМ и использовать тем самым традиционные технологии и оборудование для производства нетканых материалов. Второй подход заключается в разработке специальных методов и оборудования для смешения волокон при низком содержании волокон какого-то одного типа. Третий способ связан с разработкой способов получения НРПМ, исключающих технологическую операцию смешения волокон.

В работе [3] предложен способ введения проводящих волокон в предварительно сформированное нетканое полотно. Он основан на фильтрации суспензии УВ через нетканое полотно. После фильтрации УВ остаются на поверхности полотна и распределяются в его объёме методом иглопрокалывания [4]. Также был предложен метод получения НРПМ, при реализации которого УВ остаются на поверхности полотна в виде отдельного слоя [5].

Ранее были исследованы электрофизические свойства нетканых радиопоглощающих материалов, полученных как при распределении УВ в объёме полотна [4], так и при их фиксации в виде отдельного промежуточного слоя [5]. В результате показана эффективность применения таких материалов для поглощения электромагнитного излучения с частотой более $7 \div 10$ ГГц. Был рассмотрен способ получения широкодиапазонного НРПМ, заключающийся в применении многослойного материала, состоящего из нескольких полотен с различным содержанием УВ [5, 6].

* dedovs@rambler.ru

Целью настоящей работы являлось исследование электрофизических свойств многослойных материалов, полученных сложением полотен с равным содержанием УВ и при их распределении в форме промежуточного слоя между полотнами нетканого материала из диэлектрических волокон.

В качестве объекта исследования использовалось нетканое иглопробивное полотно с поверхностной плотностью $100 \div 120 \text{ г/м}^2$, изготовленное из полиэфирного волокна с линейной плотностью 0,33 текс (с диаметром 20 мкм). Толщина полотна составила 2 мм, а плотность $50 \div 60 \text{ кг/м}^3$. Коэффициент пористости полотна равен $0,94 \div 0,96$. Диэлектрическая проницаемость полотен зависит от их влажности; для полотен, кондиционированных в нормальных условиях, диэлектрическая проницаемость не превышает 1,3. Нетканое полотно получали промышленным способом на линии DILO (Германия) в ОАО «Монтем» механическим методом формирования волокнистого холста [7]. Волокнистый холст упрочняли при плотности прокалывания 160 см^{-2} .

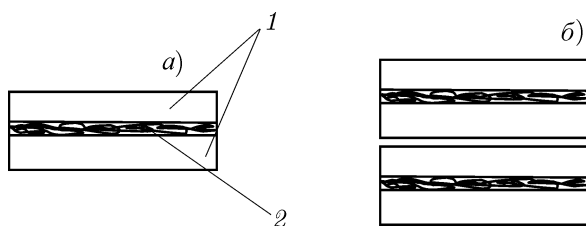


Рис. 1. Структура НРПМ (а) и многослойного материала, полученного сложением двух НРПМ (б): 1 — нетканое полотно из диэлектрических полиэфирных волокон, 2 — промежуточный слой из ориентированных в плоскости полотна углеродных волокон

Для наполнения нетканого полотна использовалось диспергированное углеродное волокно марки УГЦВ-1 с длиной 5 мм и удельным электрическим сопротивлением $0,25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Углеродные волокна наносили на поверхность полотна методом фильтрации их суспензии в воде, накрывали вторым полотном и соединяли нитепрошивным способом [7] без изменения ориентации УВ в плоскости полотна. Способ соединения отдельных полотен в многослойный материал с промежуточным слоем УВ обеспечил фиксацию толщины и плотности полотен. Использовались НРПМ, в которых содержание УВ в промежуточном слое составляло 0,17; 0,5 и $1,7 \text{ г/м}^2$. Структура НРПМ и многослойных материалов, полученных сложением двух НРПМ, представлена на рис. 1.

Коэффициент отражения R измерялся согласно рупорной методике определения коэффициента отражения № 2012–001, разработанной Инженерно-маркетинговым центром концерна «Вега» и аттестованной на соответствие ГОСТ Р 8.563–2009. В отличие от волноводных методов, рупорная методика позволяет исследовать образцы неоднородных материалов. При наличии макроскопических неоднородностей, когда сложно определить диэлектрическую и магнитную проницаемости, рупорный метод обеспечивает определение эффективных электрофизических параметров, что целесообразно во многих приложениях, таких как формирование конструкционных сотовых, вспененных или волокнистых материалов. Кроме того, условия измерения коэффициента отражения можно рассматривать как имитацию падения плоской волны на поверхность объекта, что даёт возможность оценить вклад рассеянного излучения.

Измерения коэффициента отражения с помощью панорамного измерителя коэффициента стоячей волны (по напряжению) дают возможность определять показатель преломления немагнитных образцов. Панорамный измеритель, точнее набор панорамных измерителей, позволяет развернуть участок частотной зависимости коэффициента отражения (т.е. увеличить частотный масштаб) и выявить характерные точки этой зависимости, где фаза принимает значения, кратные $\pi/4$, или определить оптическую толщину образца, которая пропорциональна нечётному числу четвертей длин волн. Положения минимумов частотной характеристики и ширина полосы по заданному уровню коэффициента отражения определяются соотношениями

$$n_1 = \lambda/[4d(2m - 1)], \quad (1)$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{8\sqrt{R}}{\pi n_1 (2m - 1)}, \quad (2)$$

где m — номер наблюдаемого минимума, отсчитываемый от нулевой частоты, λ и f — длина волны и частота минимума соответственно, Δf — разность граничных частот, на которых достигается заданное значение коэффициента отражения R , d — толщина материала, n_1 — показатель преломления.

Коэффициент отражения измерялся модифицированным прибором, созданным на базе панорамной установки «Измеритель КСВН Р2-61» (рис. 2) с пирамидальной рупорной антенной. Модифицированная установка обеспечила измерение коэффициента отражения в диапазоне частот от 2 до 34 ГГц. Апертура антенны при частоте излучения от 2 до 12 ГГц составляла 180×180 мм и при частоте от 12 до 34 ГГц — 120×120 мм. Антенна во всём диапазоне частот излучала линейно поляризованные волны. Работа измерителя коэффициента стоячей волны основана на принципе функционирования рефлектометра, т. е. выделения сигналов с энергиями, пропорциональными мощностям падающей от генератора и отражённой от образца электромагнитных волн.

Сигналы, пропорциональные мощностям падающей и отражённой электромагнитных волн, снимаются с детекторных головок и поступают в индикаторное устройство, в котором используются для автоматического вычисления коэффициентов отражения в диапазоне генерируемых частот. Полученные величины коэффициентов отражения наблюдаются на компьютере и считываются по шкале индикатора, проградуированной в децибелах (рис. 2). Для обеспечения согласования со свободным пространством и создания достаточно плоского фронта электромагнитной волны рупорная антенна имеет собственный коэффициент стоячей волны не более 1,05 и изготавливается в соответствии со следующими требованиями: угол раскрытия рупора не превосходит 10° , его выходная апертура представляет собой квадрат со сторонами не менее 4λ .

При измерении коэффициента отражения образец располагался на металлическом листе. Такая методика эксперимента обеспечила полное отражение волны, прошедшей через НРПМ. Коэффициент отражения НРПМ и многослойных материалов рассчитывался с помощью выражения

$$R = 10 \lg(E_r/E),$$

где E_r и E — мощности отражённой и падающей волн соответственно. Частотные зависимости коэффициента отражения нетканых радиопоглощающих материалов различного состава, использованных для получения многослойных структур, представлены на рис. 3.

Частотные зависимости коэффициента отражения нетканого радиопоглощающего материала, расположенного на металлическом листе, с различным содержанием УВ в промежуточном слое (рис. 3) показывают, что при использовании предложенного способа получения НРПМ он является материалом интерференционно-поглощающего типа. Поглощение излучения материалами такого типа основано на суперпозиции отражённых от нескольких поверхностей волн [8].

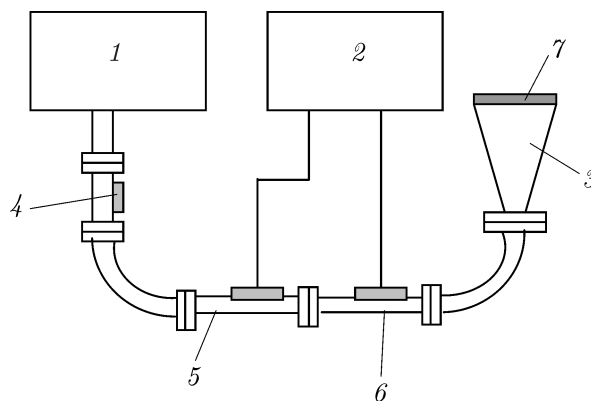


Рис. 2. Схема измерительной установки: 1 — генератор, 2 — индикатор, 3 — рупор, 4 — аттенюатор, 5 — направленный ответвитель падающей волны, 6 — направленный ответвитель отражённой волны, 7 — образец на металлическом листе

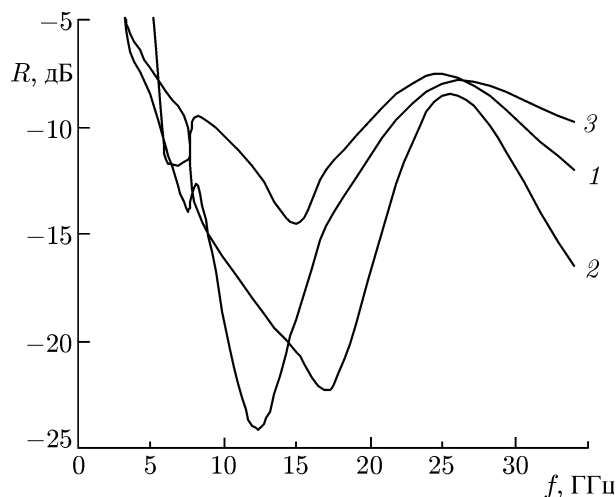


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента отражения нетканого радиопоглощающего материала, расположенного на металлическом листе, который содержит в промежуточном слое УВ с поверхностной плотностью $0,17 \text{ г/м}^2$ (кривая 1); $0,50 \text{ г/м}^2$ (2) и $1,7 \text{ г/м}^2$ (3)

жании УВ на поверхности нетканого полотна формируются различные фигуры из пересекающихся волокон, форма и размеры которых зависят от содержания УВ. При увеличении содержания УВ наблюдается формирование сложных по форме фигур, которые равномерно покрывают поверхность полотна; при максимальном содержании УВ также образуется сетка с ячейками различных размеров.

Структурные элементы промежуточного слоя УВ на поверхности нетканого полотна отражают электромагнитные волны. Частота отражённых электромагнитных волн зависит от размера и формы структурных элементов и их распределения по поверхности полотна, а процесс отражения подчиняется законам, связывающим частоту отражённой волны и размеры структурных элементов [9]. При минимальном содержании УВ снижается вероятность формирования фигур или они образуются на значительном расстоянии друг от друга. Такая дефектность приводит к значительному возрастанию коэффициента отражения (кривая 1 на рис. 3). При увеличении содержания УВ на поверхности нетканого полотна формируются различные фигуры и сетка, что приводит к расширению частотного диапазона поглощения и уменьшению коэффициента отражения (кривые 2 и 3 на рис. 3).

Особенностью НРПМ является относительно небольшая эффективность поглощения излучения низкочастотного диапазона. Так, выполнение условия $R < -10 \text{ дБ}$ (отражается меньше 10 % энергии падающего излучения, что достаточно для практического использования) достигается при частотах более $7 \div 9 \text{ ГГц}$. Увеличение содержания УВ в промежуточном слое с $0,17$ до $0,5 \text{ г/м}^2$ приводит к смещению частоты, на которой достигается минимальное значение коэффициента отражения с 12 до 18 ГГц соответственно. При уменьшении содержания УВ коэффициент отражения возрастает (рис. 3).

Для многослойных материалов, полученных сложением НРПМ с различными составами, вид частотных зависимостей коэффициента отражения, полученных при расположении многослойного материала на металлическом листе, зависит от содержания УВ в промежуточном слое каждого НРПМ (рис. 4). Многослойный материал, полученный сложением НРПМ с минимальным содержанием УВ, относится к материалам интерференционно-поглощающего типа. Однако, по срав-

Когда электромагнитные волны, отражённые от промежуточного слоя УВ и металлической основы, находятся в противофазе и одинаковы по амплитуде, происходит их взаимная компенсация. Разность фаз отражённых волн регулируется толщиной диэлектрика, или, в данном случае, толщиной нетканого полотна из диэлектрических волокон, находящимся перед промежуточным слоем УВ (рис. 1а). Необходимая толщина слоя диэлектрика равна $\lambda/4, \lambda/8, \lambda/16, \dots$

Однако зависимость частоты, при которой достигается минимальный коэффициент отражения, и зависимость минимального значения этого коэффициента от содержания УВ (рис. 3) при равной толщине НРПМ показывает, что, по сравнению с отражением от плоской поверхности, отражение электромагнитных волн от промежуточного слоя УВ представляет собой более сложный процесс. Как показали визуальные наблюдения расслоённого НРПМ, при небольшом содер-

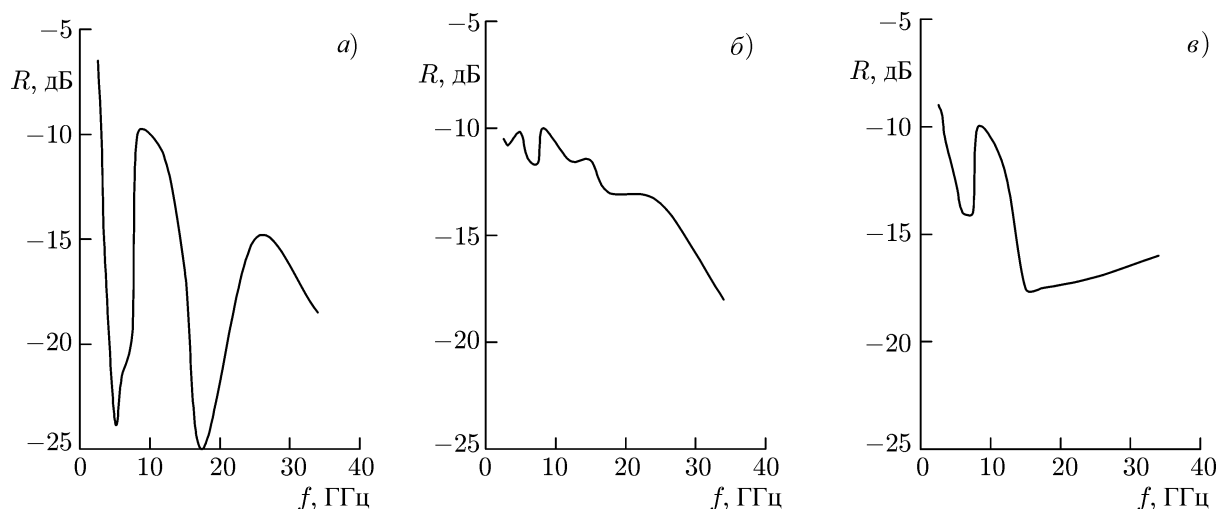


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения многослойного материала, расположенного на металлическом листе и полученного сложением двух НРПМ типа 1 (а), 2 (б) и 3 (в) по обозначениям на рис. 3

нению с НРПМ, для многослойного материала с таким составом наблюдается смещение второй частоты, при которой достигается минимальный коэффициент отражения. Условие $R < -10$ дБ при использовании такого материала выполняется при частотах более 4 ГГц (рис. 4а).

Для многослойного материала, полученного сложением НРПМ с содержанием в промежуточном слое УВ в количестве $0,5 \text{ г/м}^2$, вид частотной зависимости коэффициента отражения показывает, что поглощение излучения достигается за счёт внутреннего переотражения волн между слоями УВ [8]. Во всём использованном диапазоне частот от 2 до 34 ГГц выполняется условие $R < -10$ дБ, и коэффициент отражения уменьшается по мере возрастания частоты (рис. 4б).

Для многослойного материала, полученного сложением НРПМ с максимальным содержанием УВ в промежуточном слое, частотная зависимость коэффициента отражения характеризуется неявно выраженными частотами, на которых достигается минимальный коэффициент отражения. Такой вид частотной зависимости отражает одновременную реализацию рассмотренных выше типов поглощающих материалов. Поглощение излучения с частотой более 10 ГГц достигается за счёт суперпозиции отражённых от нескольких поверхностей электромагнитных волн. При уменьшении частоты излучения преобладающим становится поглощение за счёт переотражения между промежуточными слоями УВ. Выполнение условия $R < -10$ дБ достигается для частоты менее 3 ГГц (рис. 4в).

Выводы из проделанной работы следующие:

1) многослойный материал, полученный методом сложения полотен с равным содержанием углеродных волокон, распределённых в виде промежуточного слоя, обеспечивает расширение диапазона частот поглощения излучения, в котором коэффициент отражения $R < -10$ дБ;

2) многослойные материалы с содержанием в промежуточном слое углеродных волокон в количестве от $0,17$ до $1,7 \text{ г/м}^2$ обладают способностью поглощать излучение с частотой менее 7 ГГц; оптимальное содержание углеродных волокон в промежуточном слое составляет $0,5 \text{ г/м}^2$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание 11.1087.2014/К).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент EP 0.121.055. МКИ H01Q 17/00. Faserverbundwerkstoff / Eggert K.
2. Патент JP 0.323.826. МКИ H01Q 17/00. Electromagnetic wave absorbent / Tetsuji I.
3. Патент РФ 2197041. МКИ H01Q17/00. Способ получения радиопоглощающего материала / Назаров В. Г., Платонов А. В., Дедов А. В.
4. Дедов А. В. // Нетканые материалы. 2009. № 6 (11). С. 32.
5. Разумеев К. Э., Дедов А. В., Девин К. В. // Швейная промышленность. 2013. № 5. С. 22.
6. Дедов А. В. // Нетканые материалы. 2010. № 1 (12). С. 8.
7. Гурович К. Основы материаловедения швейного производства. СПб.: Academia, 2014. 428 с.
8. Лынько Л. М., Борботько Т. В., Богуш В. А., Кобун Н. В. // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, № 1. С. 92.
9. Добровенский В. В., Засовин Э. А., Миревичкий Д. И., Черепанов А. К. // Успехи современной радиоэлектроники. 2000. № 2. С. 61.

Поступила в редакцию 12 января 2015 г.; принята в печать 29 июня 2015 г.

MULTILAYER RADAR ABSORBING NON-WOVEN MATERIAL

A. V. Dedov and V. G. Nazarov

We study the electrical properties of multilayer radar absorbing materials obtained by adding non-woven sheets of dielectric fibers with an intermediate layer of electrically conductive carbon fibers. Multilayer materials that absorb electromagnetic radiation in a wide frequency range are obtained by varying the content of the carbon fibers. The carbon-fiber content dependent mechanism of absorption of electromagnetic radiation by sheets and multilayer materials is considered.