

УДК 621.763

О. В. Кириченко<sup>1</sup>, В. Н. Клименко<sup>1</sup>, И. А. Гусарова<sup>2</sup>, И. В. Шаповал<sup>1</sup>, Ю. А. Шевляков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем металловедения им. И. М. Францевича Национальной академии наук Украины, Київ

<sup>2</sup> Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

<sup>3</sup> Інститут хімії поверхні ім. А. А. Чуйка Національної академії наук України, Київ

## ПОЛУЧЕНИЕ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПОРИСТЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ЭКРАНИРОВАНИЯ

---

*В результате различных способов консолидирования (спекания, аэрозольного склеивания, соединения с углепластиком) дискретных и непрерывных волокон сталей аустенитного (марки 1Х18Н9Т, диаметром 10 и 30 мкм) и ферритного (марки Ст. 10, диаметром 40–100 мкм) классов получены высокопористые (пористостью 86–91 %) оптически прозрачные и газопроницаемые тонколистовые (толщиной 0.5–1.0 мм, плотностью 0.71–1.01 г/см<sup>3</sup>) и плотные (композиционные: углепластик + металлические волокна, толщиной 1.6–2.5 мм, плотностью 1.05–2.07 г/см<sup>3</sup>) материалы с эффективностью экранирования 68.5–96.0 дБ. Полученные экранирующие материалы могут быть использованы для изготовления корпусов электронной аппаратуры.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Электронная вычислительная и измерительная техника, которая базируется на наземных, воздушных, морских и космических объектах, требует защиты от помех, создаваемых различными источниками электромагнитного излучения (ЭМИ). Кроме того, как высокочастотное, так и низкочастотное ЭМИ оказывает вредное влияние на организм человека. Источниками таких ЭМИ являются бытовая электротехника, мобильная телефонная связь, высоковольтное и высокочастотное промышленное электрооборудование и др. В настоящее время также актуальны проблемы защиты компьютеров банков и офисов фирм от так называемого «электронного терроризма», обеспечения электромагнитной изоляции служебных помещений, в которых обсуждается конфиденциальная информация, и телефонных коммуникаций от возможности прослушивания. Во

всех этих случаях необходимо экранирование источника ЭМИ или объекта, который подвержен его воздействию. Для этого целесообразно использование соответствующих материалов и покрытий. К их числу относятся: металлические листы, фольги, сетки, специальные ткани и краски. Однако эти материалы работают только на отражение ЭМИ. Иногда этого недостаточно, так как отражение ЭМИ внутри корпуса радиоэлектронной аппаратуры часто становится причиной сбоя в её работе. Соответственно необходимо поглощение собственного ЭМИ и требуются экраны со способностью поглощать значительную долю энергии электромагнитных волн, т. е. обладать с электронной аппаратурой электромагнитной совместимостью. Согласно литературным данным, наиболее эффективными в этом смысле являются композиционные материалы, состоящие из металлических волокон и полимерного связующего, обладающего электрической проводимостью. Непрерывная электрическая цепь между металлическими волокнами образуется даже при их объемном содержании в материале менее 1 %; другие на-

полнители, например металлические порошки, требуют значительно большего содержания. К тому же металлические волокна не только отражают электромагнитную энергию как металлы, но и поглощают её как симметричные антенны (диполи). При этом более высоким уровнем экранирования ЭМИ обладают волокна из ферромагнитных металлов.

Известные зарубежные аналоги, например композиционные материалы, выпускаемые бельгийской фирмой «Beaert согр.», состоящие из волокон коррозионностойкой стали ВЕКI-SHILD диаметром 4—22 мкм и пластмассы, успешно используют для изготовления корпусов компьютеров, изделий электрической и цифровой техники, применяемой на судах, самолётах и ракетах. Сведений об использовании пористых экранирующих материалов, например из спеченных или соединенных между собой каким-либо другим способом металлических волокон, в литературе нет. Пористые экраны были бы уместны в конструкциях электронной аппаратуры, требующей охлаждающей вентиляции или газообмена.

**Цель работы** — получить из волокон сталей ферритного и аустенитного классов образцы пористых (спеченных или склеенных) и плотных (композиционных) материалов в виде листовых заготовок, определить их экранировочные свойства.

#### МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

В качестве исходного сырья для изготовления образцов пористых и композиционных экранирующих материалов использовались металлические волокна (рис. 1):

— диаметром 40—100 мкм углеродистой стали марки Ст. 10 (ферритного класса);

— дробь — короткие (длиной около 2 мм) волокна диаметром 40—100 мкм стали марки Ст. 10, полученные при соответствующих режимах шевингования проволоки); использовали фракцию дроби + 250 мкм, отобранную методом рассева на стандартных ситах;

— диаметром 10 и 30 мкм коррозионностойкой стали марки 1X18H9T (аустенитного класса); а также:

— эпоксидная смола марки ЭДТ-10 (полимерное связующее в композиционных материалах);

— углеткань марки УТ-2 (для улучшения электрической проводимости между металлическими волокнами, поскольку эпоксидная смола является диэлектриком, и повышения механической прочности; кроме того, углеткань сама по себе является экранирующим материалом);

— клей (лак, краска) в аэрозольной упаковке.

Технологическая схема получения из металлических волокон образцов экранирующих материалов приведена на рис. 2.

Схема содержит двенадцать технологических цепочек (вариантов) получения образцов:

I — мерная резка → формование → спекание → калибрование;

II — то же → оксидирование или двойное оксидирование;

III — мерная резка → формование → аэрозольное склеивание;

IV — мерная резка → оксидирование → формование → аэрозольное склеивание;

V — мерная резка → формование → спекание → калибрование → соединение с углепластиком;

VI — мерная резка → (оксидирование) → формование → аэрозольное склеивание → соединение с углепластиком;

VII — мерная резка → формование → соединение с углепластиком;



**Рис. 1.** Общий вид металлических волокон в состоянии поставки: 1 — бухта, 2 — катушки, 3 — жгуты, 4 — дробь (короткие волокна)

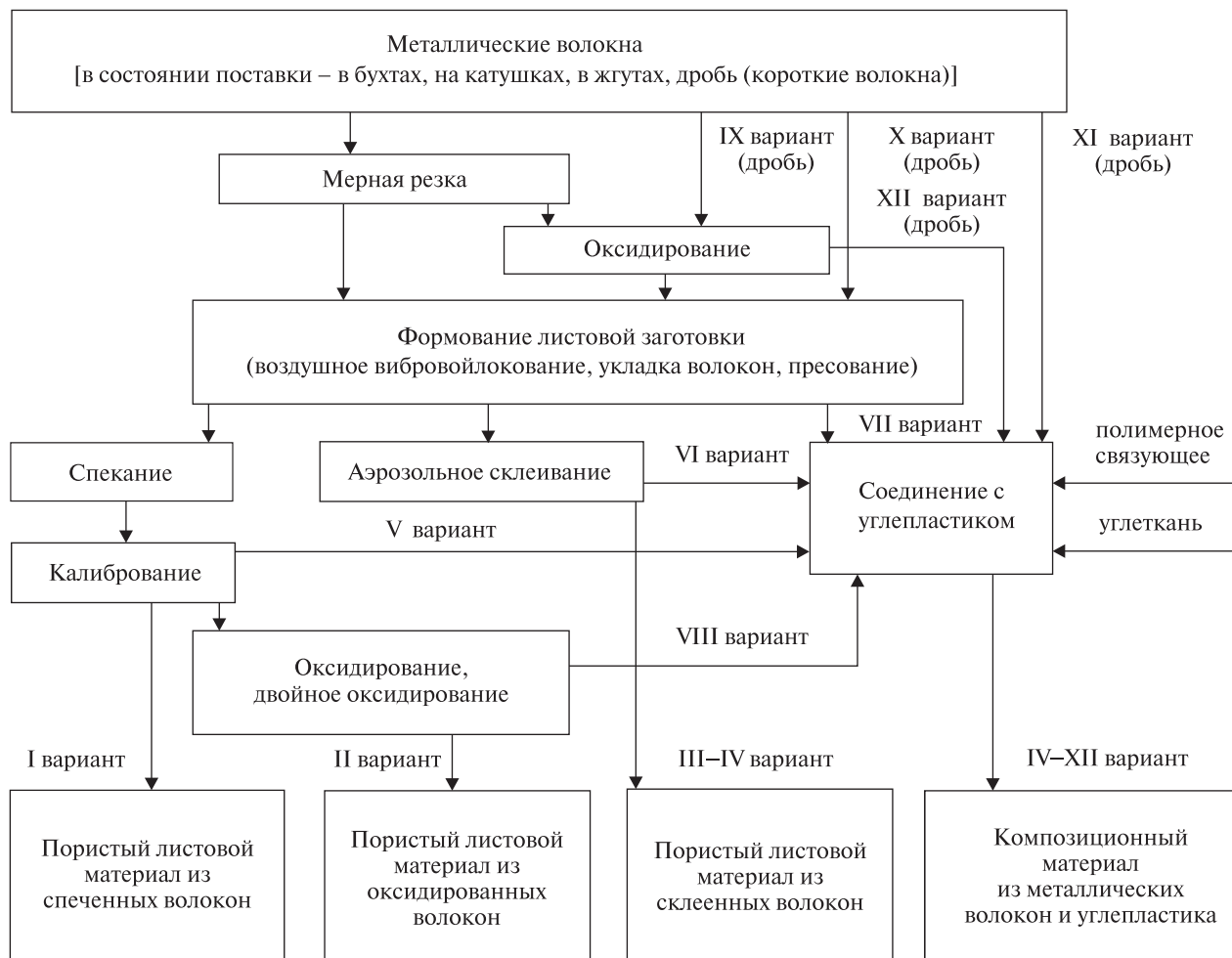


Рис. 2. Технологическая схема получения пористых и композиционных экранирующих материалов из металлических волокон

VIII — мерная резка → формирование → спекание → калибрование → оксидирование (двойное оксидирование) → соединение с углепластиком.

IX — XII варианты применяли для дроби:

IX — оксидирование → формирование → соединение с углепластиком;

X — формирование → соединение с углепластиком;

XI — соединение с углепластиком (дробь вводили в полимерное связующее);

XII — оксидирование → соединение с углепластиком (в смеси со связующим).

Однако, учитывая возможность создавать из волокон и их фрагментов многослойные композиции, первоначально мы получили 14 видов образцов композиционных материалов, конструкции (структуры) которых показаны в табл. 1. В дальнейшем пористые образцы изготавливали однослойными, а композиционные — трехслойными (два наружных слоя — углеткань, внутренний — металлические волокна).

Мерную резку выполняли на разработанной в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича Национальной академии наук Украины машине (рис. 3) гильотинно-

Таблица 1. Характеристики структуры и экранировочные свойства композиционных материалов из металлических волокон и углепластика

№ п/п	Металлическая фаза (волокна)							Композиционный материал					Свойства экранирования	
	Диаметр волокон, марка стали	Пористость, %	Масса, г	Геометрические размеры, $h \times a \times b$ , мм	Способ изготовления	Масса, г	Толщина, мм	Содержание металлической фазы, %	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Схема укладки слоев	К <sub>п</sub> , дБ			
											$f = 2$ ГГц	$f = 17$ ГГц		
1	30 мкм 1Х18Н9Т	71	6.71	0.3 × 97 × 102	Машинное виброволокно, спекание, окисливание, прессование	23.11	1.6	29	1.46	××××	-45	< -50		
2		75	14.56	0.5 × 99 × 106		30.43	1.7	47	1.70	××××				
3		62	11.70	0.4 × 99.5 × 100		24.74	1.5	47	1.73	××××				
4	40—100 мкм Ст.10		5.16	0.4 × 92 × 108	Ручная укладка непрерывных волокон, прессование	32.71	3.2	16	1.03	××××				
5			8.37	0.4 × 84 × 93		26.91	3.0	31	1.15	××××				
6		90	12.62	1.5 × 92 × 108	Машинное виброволокно, спекание	28.43	2.1	44	1.36	××××				
7			14.73	1.5 × 95 × 125		30.53	4.3	48	0.60	××××				
8			15.56	1.5 × 110 × 140	Машинное виброволокно	41.42	5.0	37	0.54	××××				
9				Св.н × 117 × 190		39.23	2.5		0.7	××××				
10				Св.ук × 125 × 140	48.11	5.0		0.55	××××		-35			
11		83	30.61	2.5 × 82.7 × 111	Ручная укладка, спекание, прессование	45.89	4.0	67	1.25	××××	-45			
12			33.64	2.5 × 93 × 126		60.13	6.0	56	0.85	××××	-35			
13			40.26	2.5 × 120 × 192	Ручная укладка, спекание	72.11	5.0	56	0.63	××××	-40			
14			47.12	2.5 × 111 × 183		64.92	1.7	72	1.88	××××	-40			

— углеродная ткань; ×××× — спеченные дискретные волокна; // // // // // — рубленые волокна; ~~~ — непрерывные волокна; +Al — алюминиевая пудра; ▲ — фрагменты непрерывных волокон; ~~~~ — спеченные непрерывные волокна; ○○○○○ — гранулы

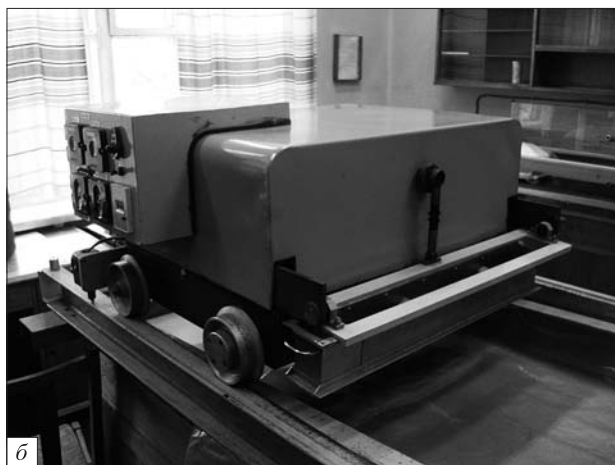


Рис. 3. Машина для резки жгутов на мерные волокна (а) и установка для формования из волокон листовых заготовок (б)

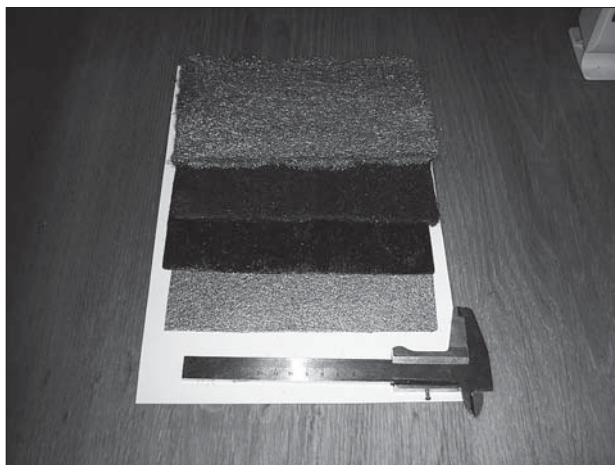


Рис. 4. Внешний вид образцов пористых материалов

го типа (отрубном штампе), что обеспечивало получение дискретных волокон заданной длины. После мерной резки часть волокон, а после спекания — часть пористых образцов подвергали оксидированию на воздухе при температуре 300 °С — из стали марки Ст. 10 и 450 °С — из стали марки 1Х18Н9Т, с целью получения на поверхности волокон магнетита — оксида  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , обладающего повышенными экранировочными характеристиками за счет магнитных свойств.

Второе оксидирование пористых заготовок осуществлялось в тех же условиях, что и первое оксидирование, после их пропитки маслом для образования на поверхности волокон плотной углеродосодержащей пленки, повышающей коррозионную стойкость и механическую прочность пористого материала из Ст. 10.

Формование листовых заготовок выполняли в основном методом воздушного войлокования на разработанной в ИПМ НАН Украины установке (рис. 3, б), которая обеспечивала равномерное распределение волокон на стальной подложке, углеткани или полиэтиленовой пленке. Для получения листовых заготовок из непрерывных (в пределах габаритов изделия) волокон применяли прессование на гидравлическом прессе марки П-125 после укладки волокон в плоские прессформы прямоугольной формы.

Спекание образцов проводилось в вакууме при температуре 1200—1250 °С, в течение одного часа. После спекания образцы калибровались до заданных размеров — обрезали кромки и корректировались по высоте с помощью прессы.

Склеивание волокон с целью их консолидации в листовую заготовку осуществлялось в процессе воздушного войлокования (осаждения) на полиэтиленовую пленку с использованием клея в аэрозольной упаковке. После высыхания склеенный слой волокон легко отделялся от пленки.

Образцы композиционных материалов изготавливались путем соединения углеткани и спеченых, склееных или дискретных волокон эпоксидной смолой. Практически это выглядело таким образом: на подложку, покрытую полиэтиленовой пленкой, укладывали первый слой углеткани, промазывали его эпоксидной смо-

лой, наносили слой одной из указанных модификаций металлических волокон, затем — второй слой углеткани, пропитанной эпоксидной смолой, а сверху покрывали полиэтиленовой пленкой и стальным листом с грузом сверху. Отвердевание композиции требовало нескольких часов выдержки (в зависимости от температуры окружающей среды и состава эпоксидной смолы). Общий вид образцов сформованных и спеченных из стальных волокон показан на рис. 4.

#### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКРАНИРОВОЧНЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ

Энергия электромагнитных волн, попадая на экран, частично отражается и поглощается, а некоторая часть её проходит (пропускается) через экран соответственно:

$$P_{\Sigma} = P_{O} + P_{\Pi} + P_{\Pi p}, \quad (1)$$

где  $P_{\Sigma}$  — падающая,  $P_{O}$  — отраженная,  $P_{\Pi}$  — поглощенная,  $P_{\Pi p}$  — пропущенная энергия.

В общепринятой практике эффективность экранирования ( $K_{\Sigma}$ ) определяют по логарифмической зависимости отношения энергий пропускаемого потока электромагнитных волн к падающему:

$$K_{\Sigma} = 10 \lg(P_{\Pi p}/P_{\Sigma}), \text{ дБ}, \quad (2)$$

или по сумме величин отражения и поглощения:

$$K_{\Sigma} = K_{O} + K_{\Pi}, \text{ дБ}, \quad (3)$$

где

$$K_{O} = 10 \lg(P_{O}/P_{\Sigma}) = 10 \lg(P_{\Sigma} - P_{\Pi} - P_{\Pi p})/P_{\Sigma}, \quad (4)$$

$$K_{\Pi} = 10 \lg(P_{\Pi}/P_{\Sigma}) = 10 \lg(P_{\Sigma} - P_{O} - P_{\Pi p})/P_{\Sigma}. \quad (5)$$

Иногда для определения характеристик экрана в долях единицы используется выражение

$$K_{O} + K_{\Pi} + K_{\Pi p} = 1, \quad (6)$$

$$K_{O} = P_{O}/P_{\Sigma}, \quad (7)$$

$$K_{\Pi} = P_{\Pi}/P_{\Sigma}, \quad (8)$$

где  $K_{O}$  — коэффициент отражения,  $K_{\Pi}$  — коэффициент поглощения,  $K_{\Pi p}$  — коэффициент пропускания:

$$K_{\Pi p} = P_{\Pi p}/P_{\Sigma}, \text{ либо } K_{\Pi p} = 10 \lg(P_{\Pi p}/P_{\Sigma}), \text{ дБ}. \quad (9)$$

Следует отметить, что определение величины  $K_{\Sigma}$  по формуле (3) является методически достаточно сложным, так как установить точно энер-

гию отраженных волн, которые взаимодействуют с падающим потоком, создавая интерференцию, приводящую не только к взаимному гашению волн, но и к резонансным явлениям, трудно осуществить. Что касается определения энергии поглощения  $P_{\Pi}$ , то такая методика, которая могла бы обеспечить достаточно корректные данные, требует использование специальной камеры с абсолютной электромагнитной изоляцией испытательной установки от окружающей среды. Наиболее доступно определение  $K_{\Sigma}$  материала по формуле (9) путем измерения его коэффициента пропускания  $K_{\Pi p}$ .

Испытания образцов экранирующих пористых и композиционных материалов, полученных из металлических волокон, согласно технологической схеме, представленной на рис. 2, проводились в Институте химии поверхностей им. А. А. Чуйко Национальной академии наук Украины.

Эффективность экранирования оценивалась по коэффициенту пропускания  $K_{\Pi p}$ . Измерения выполнялись в экранированном помещении (по методу свободного пространства) при частоте 2.5 ГГц. В состав испытательного оборудования входили: генератор ЭМИ ГЗ-22 (1.8—3.0 ГГц), передающая антенна Пб-16, приемная антенна Пб-23а, измерительно-селективный усилитель У2-8.

Образцы поочередно помещали в окошке, выполненном в стенке, изолированной от ЭМИ комнаты, предварительно вкладывая каждый из них в экранирующий конверт, выполненный из сетки с размером ячейки 50 мкм и предотвращающий утечку электромагнитных волн через зазор между фланцем и металлической стенкой в месте крепления образца.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Установление зависимости эффективности электромагнитного экранирования пористых и композиционных материалов от диаметра и длины волокон, плотности металлической фазы, выбранного химического состава композиционного материала.

Первоначально из углеткани и стальных волокон — дискретных и непрерывных — были изго-

товлены 14 образцов слоистых (от трех до шести слоёв) композиционных материалов, причем стальные волокна были консолидированы в листовые заготовки различными способами, включающими воздушное войлокование, ручную укладку, а также спекание; далее следовало соединение стальных волокон с углетканью при помощи полимерного связующего — эпоксидной смолы (табл. 1). Задача поиска на этом этапе работы сводилась к выбору из всех приведенных примеров — наиболее простого по конструкции композиции и технологии получения материала, которые обеспечивали бы заданный уровень экранирующих свойств. Анализ данных, приведенных в табл. 1, дает возможность выявить один из таких вариантов, которому соответствует образец № 9. Образец выполнен в виде трехслойной композиции: два наружных слоя — углеткань, внутренний — дискретные волокна диаметром 40—100 мкм стали марки Ст. 10, осажденные методом машинного воздушного войлокования и соединенные с углетканью эпоксидной смолой. Судя по экранировочным характеристикам, также представляют интерес трехслойные композиции, в состав которых входят листовые заготовки из спеченных волокон диаметром 30 мкм стали марки 1X18H9T (образцы № 1, 2). Отметим, что сборка композиционного материала со спеченными металлическими волокнами (соединение с углетканью эпоксидной смолой) является более простой и легко осуществимой, чем в случае использования дискретных волокон, кроме того, доступнее становится контроль состояния структуры металлической фазы на её соответствие заданным параметрам — пористости, толщине, размеру пор, однородности и др.

Коэффициент поглощения  $K_{\Pi}$  определялся поочередно с обеих сторон образцов. Как видим из табл. 1, значения  $K_{\Pi}$  для каждой из сторон образцов с несимметричными (относительно горизонтальной плоскости, проходящей через геометрический центр образца) структурами (образцы № 3, 5, 6, 11, 12) заметно отличаются друг от друга, что представляет интерес при создании экранирующих материалов, одна из сторон которых обладает в большей мере поглощательными, а вторая — отражательными свойствами.

Отражение электромагнитных волн экраном — важная составляющая экранирования в целом, от которой зависит степень обеспечения заданного уровня защиты объекта от ЭМИ. В табл. 2 приведены значения коэффициента отражения, полученные в результате испытания образцов, изготовленных из углепластика и волокон сталей аустенитного и ферритного классов, в электромагнитном поле частотой 10 ГГц. Толщина образцов составляла 1.0—10.0 мм, пористость — 70—95 %.

Наиболее высокими значениями коэффициента отражения ЭМИ обладают образцы материалов № 1 — 4, 8, 9, консолидированные из волокон сталей марок Ст. 10 и 1X18H9T по I варианту технологической схемы.

Коэффициенты отражения образцов № 1 — 4, 8, 9 пористостью 70—88 % составляют 95—99 %. Коэффициенты отражения образцов № 5, 7 пористостью 92—98 % составляют 81—83 %. Наименьшие значения коэффициента отражения ЭМИ имеют образцы № 6, 10, 11, 12, изготовленные по II варианту технологической схемы.

Следует иметь в виду, что сравнительно невысокие значения коэффициентов отражения образцов № 6, 10, 11 и 12 не являются признаком низких показателей их возможностей экранирования. Эти образцы, самые толстые из всех испытанных (5—10 мм), и наверняка второй компонент, отвечающий за эффективность экранирования материала — поглощение ЭМИ — может быть достаточно высоким.

В дальнейшем разработка экранирующих материалов на основе углепластика и металлических волокон велась в соответствии с техническими требованиями КБ «Южное» (г. Днепропетровск) (эффективность экранирования  $K_{\Sigma} < -50$  дБ), кроме этого, решалась задача создания пористых оптически- и газопроницаемых экранирующих материалов.

В табл. 3 приведены характеристики структуры и свойства экранирования образцов пористых тонколистовых материалов из спеченных стальных волокон, а также — композиционных материалов из этих же волокон и углепластика. Методика изготовления образцов состояла в следующем: формованием и спеканием из дис-

Таблица 2. Коэффициент отражения электромагнитного излучения пористыми материалами из металлических волокон

№ п/п	$d_b$ , мкм	Марка стали	Толщина листа, мм	Пористость, %	$K_o$ при $f = 10$ ГГц	
					дБ	%
1	40 ... 100	Ст. 10	1.0	88	-0.044	99
2	40 ... 100	Ст. 10	3.5	87	-0.088	98
3	40 ... 100	Ст. 10	0.3	75	-0.088	98
4	30	1X18H9T	0.5	70	-0.044	99
5	40 ... 100	Ст. 10	1.0	92	-0.915	81
6	40 ... 100	Ст. 10	10.0	98	-2.757	53
7	40 ... 100	Ст. 10	2.5	98	-0.809	83
8	40 ... 100	Ст. 10	1.3	87	-0.177	96
9	30	1X18H9T	0.3	80	-0.223	95
10	30	1X18H9T	10.0	99	-6.021	25
11	40 ... 100	Ст. 10	8.0	95	-3.010	50
12	40 ... 100	Ст. 10	5.0	98	-2.441	57

Таблица 3. Характеристики структуры и экранировочные свойства образцов пористых и композиционных материалов, из спеченных стальных волокон

№ п/п	$d_b$ , мкм	Марка стали	Пористость, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Толщина, мм	$K_{пр}$ , дБ при $f = 6-8$ ГГц	$K_{пр}$ , дБ при $f = 2.5$ ГГц
<i>Пористые после спекания</i>							
1	30	1X18H9T	90	0.78	0.5	0.0	-72
2	30	1X18H9T	91	0.72	0.8	0.0	-75
3	30	1X18H9T	91	0.76	2.4	0.0	-79
4	40...100	Ст.10	87	1.01	0.5	-0.05	-79
5	40...100	Ст.10	90	0.71	0.9	0.0	-70
6	40...100	Ст.10	88	0.83	1.1	-0.4	-74
<i>Пористые после спекания и оксидирования</i>							
7	30	1X18H9T	90	0.82	0.5	0.0	-69
8	30	1X18H9T	90	0.72	0.8	0.0	-72
9	30	1X18H9T	91	0.69	1.2	0.0	-78
10	40...100	Ст.10	86	1.07	0.5	0.0	-74
11	40...100	Ст.10	89	0.89	0.8	0.0	-76
12	40...100	Ст.10	86	1.07	1.0	0.0	-78
<i>Композиционные: углепластик + спеченные и оксидированные стальные волокна</i>							
13	30	1X18H9T	—	1.05	2.0	-0.5	-76
14	30	1X18H9T	—	1.08	2.3	-0.5	-90
15	30	1X18H9T	—	1.41	2.5	-0.3	-89
16	40...100	Ст.10	—	1.52	2.0	-0.4	-89
17	40...100	Ст.10	—	2.07	1.6	-0.4	-72
18	40...100	Ст.10	—	1.28	2.3	-0.4	-92



кретных волокон длиной 5 мм получали (по I варианту технологической схемы) листовые заготовки (6 штук) размером 85 × 330 мм, каждую из которых затем разрезали на три равные части (85 × 110 мм); первая часть — образцы № 1—6 — оставались без изменения и являлись носителями базовых характеристик структуры образцов, вторую часть — образцы № 7—12 — подвергали оксидированию (вариант II технологической схемы), из третьей части — образцы № 13—18 — изготавливались образцы трехслойного композиционного материала (VIII вариант технологической схемы).

При сравнении эффективности экранирования всех трех групп образцов можно сделать заключение:

— все образцы, изготовленные из волокон стали 1X18H9T (диаметром 30 мкм) и из волокон стали Ст. 10 (диаметром 40...100 мкм), имеют приблизительно равный уровень свойств экранирования;

— наибольшее влияние на эффективность экранирования образцов оказывает толщина материала и его пористость;

— композиционные материалы из спеченных стальных волокон имеют более высокие показатели эффективности экранирования, чем

пористые материалы, спеченные из этих же волокон;

— образцы пористых материалов из спеченных волокон, судя по значениям коэффициента поглощения  $K_{\text{п}}$ , за исключением образцов № 4 и 6, экранируют ЭМИ за счет отражения, как плотные металлы, в то время как композиционные материалы экранируют ЭМИ со значительной долей его поглощения.

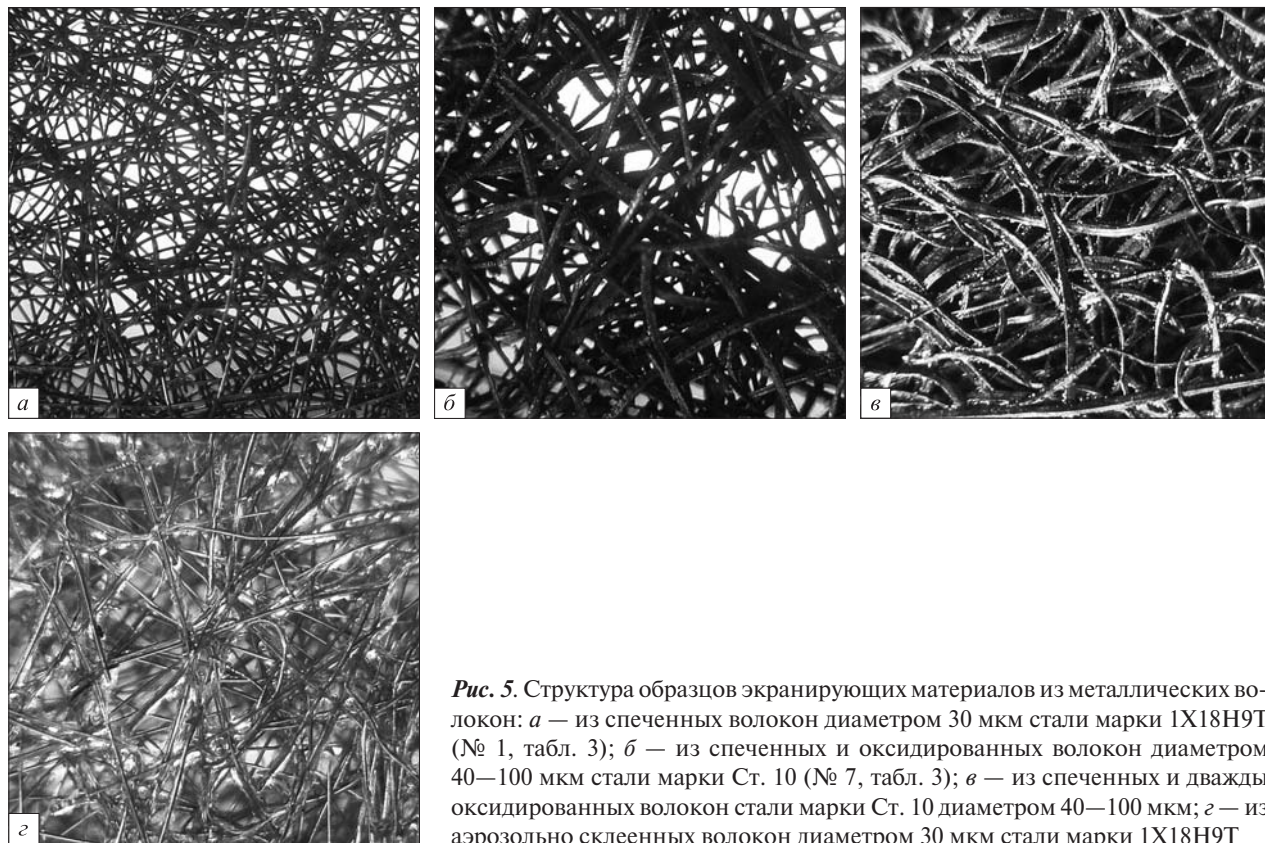
В табл. 4 содержатся сведения о волокнах стали марки Ст. 10 и 1X18H9T, которые были консолидированы в листовые заготовки, а затем соединены с углетканью (двумя наружными слоями) эпоксидной смолой, и о экранировочных свойствах полученных таким образом материалов. Образцы изготавливали из волокон двух видов — в исходном состоянии и оксидированные (вариант VI технологической схемы).

Сопоставление эффективности экранирования образцов таких материалов свидетельствует о следующем:

- представляет интерес для дальнейшего практического использования композиционный материал из волокон стали марки 1X18H9T диаметром 10 мкм и при их массовой доле в материале 4 %, значение  $K_{\text{э}}$  которого равно -80 дБ (при частоте ЭМИ 2.5 ГГц);

**Таблица 4. Характеристики структуры и экранировочные свойства образцов композиционных материалов на основе углепластика, содержащих стальные волокна, предварительно консолидированные в листовые заготовки аэрозольным склеиванием**

№ п/п	Марка стали	$d_{\text{в}}$ , мкм	$l_{\text{в}}$ , мм	Массовая доля волокон, %	Состояние поверхности волокон	Экранировочные свойства при $f = 2.5$ ГГц		
						$K_{\text{о}}$		$K_{\text{э}}$ , дБ
						дБ	%	
1	1X18H9T	10	2.5	4	оксидированная			-80
2	1X18H9T	10	2.5	8	оксидированная			-81
3	1X18H9T	30	5	8	исходная	-0.5	89	-75
4	1X18H9T	30	5	13	исходная			-76
5	1X18H9T	30	5	17	исходная	-0.5	89	-83
6	Ст.10	40 ... 100	5	14	исходная			-76
7	Ст.10	40 ... 100	5	20	оксидированная			-74
8	Ст.10	40 ... 100	8	20	оксидированная	-0.4	91	-80
9	Ст.10	40 ... 100	3	22	оксидированная			-96
10	Ст.10	40 ... 100	3	29	исходная			-79



**Рис. 5.** Структура образцов экранирующих материалов из металлических волокон: *а* — из спеченных волокон диаметром 30 мкм стали марки 1X18H9T (№ 1, табл. 3); *б* — из спеченных и оксидированных волокон диаметром 40—100 мкм стали марки Ст. 10 (№ 7, табл. 3); *в* — из спеченных и дважды оксидированных волокон стали марки Ст. 10 диаметром 40—100 мкм; *г* — из аэрозольно склеенных волокон диаметром 30 мкм стали марки 1X18H9T

**Таблица 5.** Характеристики структуры и экранировочные свойства композиционных материалов из углепластика и дискретных стальных волокон

№ п/п	Марка стали	$d_{\text{в}}$ , мкм	Толщина материала, мм	Массовая доля металлических волокон, %	Состояние поверхности металлических волокон	$K_{\text{о}}$ при $f = 4$ ГГц		$K_{\text{э}}$ , дБ при $f = 2.5$ ГГц
						дБ	%	
1	1X18H9T	10	1.7	3.5	исходная	-0.4	91	-77.5
2	1X18H9T	30	2.6	8.0	исходная			-68.5
3	1X18H9T	30	2.5	8.0	исходная			-80
4	1X18H9T	30	3.0	17.0	исходная	-0.4	91	-68.5
5	1X18H9T	30	3.0	21.0	исходная			-69.5
6	Ст.10	40 ... 100	3.0	9.6	исходная			-93
7	Ст.10	40 ... 100	4.0	11.3	оксидирован			-89
8	Ст.10	40 ... 100	3.0	13.0	оксидирован			-80
9	Ст.10	40 ... 100	3.0	15.0	исходная			-81
10	Ст.10	40 ... 100	2.7	17.0	оксидирован	-0.6	87	-68
11	Ст.10	40 ... 100	2.5	23.0	оксидирован			-90
12	Ст.10	40 ... 100	3.5	33.0	оксидирован			-95
13	Углепластик	—	1.3	0	—	-0.5	89	-65.8

- образцы материалов с более высокими значениями  $K_{\Sigma}$  (образцы № 2, 5, 9) содержат соответственно в 2; 4.25 и 5.5 раза больше металлической фазы, что в ряде случаев может быть недопустимо, если масса изделия является ограниченной;

- на примере образцов № 7 и 8 видно, что более длинные волокна обеспечивают более высокий уровень экранировочных свойств композиционного материала (при прочих равных условиях);

- оксидирование поверхности стальных волокон является одним из методов повышения эффективности экранирования композиционных материалов, в состав которых входят такие волокна.

В табл. 5 сведены результаты испытаний на экранирование ЭМИ образцов материалов, полученных из дискретных волокон, путем машинного вибронасева их на углеткань, пропитанную эпоксидной смолой, с последующим нанесением второго слоя углеткани, также пропитанного смолой.

Как видим из таблицы, экранировочные свойства образцов зависят от содержания металлической фазы в материале следующим образом.

1. Увеличение массовой доли металлической фазы в материале от 8 % (образец № 2) до 33 % (образец № 12) способствует повышению эффективности экранирования от -68.5 до -95 дБ;

2. Самые тонкие (диаметром 10 мкм) из всех используемых в работе стальных волокон (образец № 1) позволяют, при сравнительно малом их содержании в углепластике (массовая доля 3.5 %), получать достаточно высокие показатели экранирования ЭМИ; более высокие значения  $K_{\Sigma}$  имеют образцы № 3, 8, 11 и 12, однако содержание металлической фазы в них по массе в 2.3—9.4 раза больше;

3. Углепластик (без металлических волокон) имеет более низкие показатели экранирования ЭМИ (-65.8 дБ), чем композиционные матери-

алы из углепластика, наполненного металлическими волокнами.

Структуры некоторых образцов из разработанных экранирующих материалов показаны на рис. 5.

## ВЫВОДЫ

В результате различных способов консолидирования (спекания, аэрозольного склеивания, соединения с углепластиком) дискретных и непрерывных волокон сталей аустенитного (марки 1Х18Н9Т, диаметром 10 и 30 мкм) и ферритного (марки Ст. 10, диаметром 40—100 мкм) классов, получены высокопористые (пористостью 86—91 %) оптически прозрачные и газопроницаемые тонколистовые (толщиной 0.5—1.0 мм, плотностью 0.71—1.01 г/см<sup>3</sup>) и плотные (композиционные: углепластик + металлические волокна, толщиной 1.6—2.5 мм, плотностью 1.05—2.07 г/см<sup>3</sup>) материалы со следующей эффективностью экранирования электромагнитного излучения:

- пористые из спеченных волокон -70...-79 дБ;

- пористые из спеченных и оксидированных волокон -70...-78 дБ;

- композиционные трехслойные (два наружных слоя из углеткани, внутренний — из спеченных стальных волокон, полимерное связующее — эпоксидная смола) -72...-92 дБ;

- композиционные материалы аналогичной конструкции из дискретных волокон -68.5...-95 дБ;

- композиционные материалы, в которых стальные волокна предварительно консолидированы аэрозольным склеиванием -74...-96 дБ.

Полученные экранирующие материалы могут быть использованы для изготовления корпусов электронной аппаратуры для космической техники.

*Стаття надійшла до редакції 27.05.14*

*О. В. Кириченко, В. М. Клименко,  
І. О. Гусарова, І. В. Шаповал, Ю. А. Шевляков*

**ОТРИМАННЯ ІЗ МЕТАЛЕВИХ ВОЛОКОН  
ПОРИСТИХ І КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ  
З ВИСОКОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ ЕКРАНУВАННЯ**

В результаті різних способів консолідації (спікання, аерозольного склеювання, з'єднання з вуглепластиком) дискретних і неперервних волокон сталей аустенітного (марки 1Х18Н9Т, діаметром 10 і 30 мкм) і феритного (марки Ст. 10, діаметром 40...100 мкм) класів, отримано високопористі (пористістю 86...91 %) оптично прозорі і газопроникні тонколистіві (товщиною 0.5...1.0 мм, густиною 0.71...1.01 г/см<sup>3</sup>) і щільні (композиційні: вуглепластик + металеві волокна, товщиною 1.6...2.5 мм, густиною 1.05...2.07 г/см<sup>3</sup>) матеріали з ефективністю екранування –68.5...96.0 дБ. Отримані екранувальні матеріали можуть бути використані для виготовлення корпусів електронної апаратури.

*O. V. Kirichenko, V. N. Klimenko,  
I. A. Gusarova, I. V. Shapoval, Yu. A. Shevliakov*

**THE PRODUCTION AND SCREENING  
EFFICIENCY OF POROUS AND COMPOSITION  
MATERIALS FROM STEEL FIBRES**

High-porous (86—91 %) optically transparent and gas-penetrating thin-sheet (0.5—1.0 mm, with the density from 0.71 to 1.01 g/cm<sup>3</sup>) and dense (composition: carbon fiber-reinforced plastic + metal fibres, 1.6—2.5 mm, with the density from 1.05 to 2.07 g/cm<sup>3</sup>) materials with the screening efficiency from 68.5 to 96.0 dB are produced by various ways of consolidation (sintering, aerosol agglutination, composition with carbon fiber-reinforced plastic) of discrete and continuous austenitic (1X18H9T, a diameter of 10 and 30 μm) and ferritic (St. 10, diameter from 40 to 100 μm) steel fibres. The screening materials obtained can be used to make corps of electronic devices.