

СОЗДАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЛИТОГО МИКРОПРОВОДА В СТЕКЛЯННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ ПОДЖИГА ТОПЛИВА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.

Д.В. Масайло, П.А. Кузнецов, Б.В. Фармаковский

ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», Санкт - Петербург

Введение

Обычно при формировании требуемой конфигурации квазиоптических электромагнитных (ЭМ) пучков в микроволновом (МВ) диапазоне длин волн λ используют или рупорно-зеркальные системы, или системы на основе металлопластинчатых линз, или линз из диэлектрических материалов. Последние позволяют транспортировать ЭМ излучение между пространствами с существенно различающимися газовыми условиями, соблюдая требования герметичности и механической прочности. Под термином «квазиоптические» подразумеваются ЭМ пучки с поперечным размером r в десятки-сотни λ . При этом использование традиционных радиопрозрачных материалов (полиэтилен, фторопласт, полистирол, кварц и т.п.), которые характеризуются значениями ϵ в диапазоне $2 \div 4$, делает такие линзы очень «толстыми» и тяжелыми при существенном отражении ЭМ энергии от их граничных поверхностей.

Основной целью работы являлось создания нового композиционного радиопрозрачного материала на основе микропроводов с высокой электропроводностью в стеклянной изоляции. Следует отметить, что СВЧ разряд рассматривается как один из перспективных способов поджига топлива летательных аппаратов.

1. Технология литья микропроводов в стеклянной изоляции.

Одним из перспективных материалов, позволяющих обеспечить в приборостроении решение вопросов, связанных с миниатюризацией, повышением точности и стабильности, расширением диапазона допустимых климатических и механических воздействий, является микропровод в стеклянной изоляции.

Сверхмалый диаметр микропровода - до 1 мкм - обеспечивает существенное снижение массы и габаритов элементов из микропровода, уменьшает их механическую, тепловую, магнитную и электрическую инертность. Эластичная сплошная стеклянная изоляция предохраняет материал жилы от внешних воздействий и является предпосылкой для длительной стабильности, высокой надежности и точности элементов из микропровода, этому способствует также аморфная или нанокристаллическая структура материала жилы. Это дает возможность создавать принципиально новые виды изделий.

Сущность процесса формирования микропровода рассматриваемым способом может быть сведена к следующему (рис. 1).

Навеска металла в несколько грамм помещается в стеклянную трубку с опасным донцом и вместе с последней вводится в индуктор высокочастотной установки. Под действием магнитного поля индуктора навеска металла плавится и размягчает примыкающие к ней стенки стеклянной трубки. Кроме расплавления металла магнитное поле индуктора обеспечивает поддержание металла в средней части индуктора во взвешенном состоянии в виде микрованны - капли расплавленного металла в вязкой стеклянной оболочке на конце стеклянной трубки. В дальнейшем, путем прикосновения к донцу микрованны стеклянным штабиком, часть ее оболочки оттягивается на специальное приемное устройство в виде стеклянного капилляра со сплошным металлическим заполнением в виде непрерывной токопроводящей жилы. На пути от микрованны до приемного устройства микропровод проходит зону активного охлаждения через

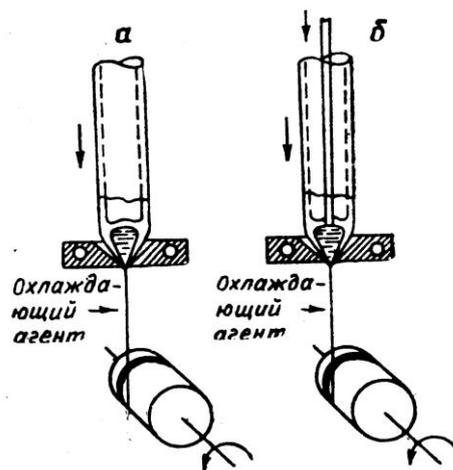


Рис.1. Получение микропровода в стеклянной изоляции из расплава металлов и сплавов:
а - «капельный» способ; б – «непрерывный» способ

кристаллизатор в виде струи, охлаждающего агента (вода, масло, кремнийорганические жидкости).

Основная особенность изготовления микропровода - взвешенная плавка металла токами высокой частоты с последующим заполнением капилляра, вытягиваемого из размягченной стеклянной трубки и его активная закалка со скоростями до 10^6 K^{-1} . Поэтому электродинамическое взаимодействие в системе индуктор-капля, определяющее температуру и форму расплава, оказывает существенное влияние на весь ход процесса литья микропровода.

2. Создание материалов на основе аморфных и нанокристаллических микропроводов

В ходе работы были выбраны базовые конструкции, представленные на рисунке 2.



Рисунок 2. Базовые конструкции образцов на основе микропровода; а – полное заполнение отрезками микропровода, б- частичное заполнение отрезками микропровода

Для изготовления композиционных материалов использовался магнитный микропровод из сплава на основе никеля (NiCrCuMnSiB), а также микропровод из меди (Cu). При этом образец 2а изготавливался из магнитного микропровода, образец 2б – из магнитного и медного провода.

На первом этапе бобины с микропроводом (рис. 3) разрезались поперек направлению намотки микропровода. В результате этой процедуры получались длинномерные куски микропровода, которые затем скручивались в бумагу и нарезались на отрезки («пыжики») толщиной 10 мм.

На втором этапе полученные «пыжики» пропитывались жидким стеклом (Na_2SiO_3) для скрепления микропровода.



Рисунок 3. Микропровод из магнитного сплава

Изготовление кольцевого композита проводилось одновременно с пропиткой и укладыванием «пыжиков» в обжимное кольцо.

Полученный образец в оправке представлен на рисунке 4. Образец получился полупрозрачным, что наглядно видно на рисунке при просмотре через лампу дневного освещения и через солнечный свет, соответственно.

Геометрические характеристики образца: толщина со слоем стекла — 7–9 мм, диаметр – 115 мм.



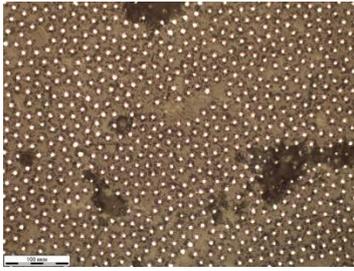
Рисунок 4. Готовый образец (а- с полным заполнением, б – с частичным заполнением)

Для изготовления образца из магнитных пыжей был построен чертеж-шаблон (рисунок б), в котором были отмечены места расположения образцов с микропроводом. В соответствии с чертежом были изготовлены пыжи, которые пропитывались жидким стеклом и высушивались в печи. Затем они были расположены по шаблону и залиты жидким раствором стекла.

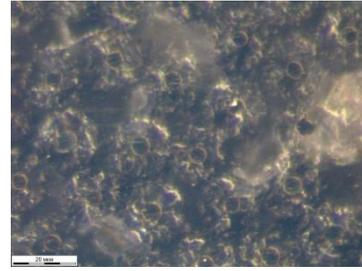
Также был изготовлен образец из медных пыжей. Пыжи также пропитывались жидким стеклом и высушивались в печи. Затем они были расположены по шаблону, заполнены стекловолокном и пропитаны жидким раствором стекла.

3. Металлографические исследования полученных материалов

На рисунке 5 представлены фотографии «пыжиков» на оптическом микроскопе в светлом и темном поле. В светлом поле отчетливо видны жилы микропроводов, а в темном границы стеклянной изоляции.



светлое поле



темное поле

Рисунок 5. Оптические фотографии, полученные на шлифах пыжиков.

На рисунке 6 представлены оптические фотографии «пыжиков» из медного микропровода. На снимках хорошо видны металлические жилы диаметром 50 – 70 мкм. Толщина стеклянной изоляции при таком увеличении не различается.

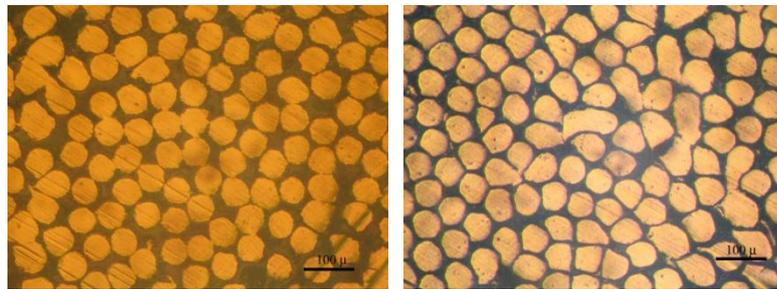


Рисунок 6. Оптические фотографии, полученные на шлифе образца с центральным заполнением из медного микропровода (увеличение x50).

В начале были проведены исследования на магнитном микропроводе.

Измерения магнитных и диэлектрических спектров проводились на плоских образцах, в которых микропровода были уложены параллельно друг другу. При этом измерения на частотах 1 – 5 ГГц проводились в коаксиальной линии, а на частотах 8,5 и 10 ГГц в волноводном тракте при двух ориентациях микропровода вдоль вектора электрического поля. Полученные данные представлены в следующей таблице.

Таблица 1. Результаты измерения высокочастотных магнитных свойств магнитного микропровода

№	Частота, ГГц																													
	1				2				3				4				5				8,5				10					
	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''						
1	93	4,4	1	0,3	73	16	$\frac{1}{5}$	0,9	83	35	$\frac{1}{6}$	0,9	93	32	$\frac{1}{7}$	1,8	40	6	4	3										
2																					91	32	0, 1,5	3	90	3, 0, 1, 7	2, 3			
3																					13	14	2, 2,9	7	11	11	-1	0, 9	5	5

Расшифровка образцов:

1. Образец из микропровода в виде шайбы, толщиной 0,5 мм.
2. Образец из микропровода плоский, толщиной 0,5 мм, расположен вдоль широкой стенки волновода.
3. Образец из микропровода плоский, толщиной 0,5 мм, расположен вдоль узкой стенки волновода.

Из полученных данных следует, что при ориентации микропровода перпендикулярно вектору электрического поля диэлектрические потери (ϵ'') возрастают на порядок (образцы 2 и 3). Высокие значения действительной части диэлектрической проницаемости (ϵ') могут быть объяснены наличием емкостной связи между металлическими жилами. Магнитная проницаемость (μ') микропровода с увеличением частоты возрастает и в диапазоне частот 5 – 8,5 ГГц меняет свой знак, что говорит о наличии ферромагнитного резонанса в этой полосе частот.

Следует отметить, что при испытании композиционных образцов из микропроводов, характеристики отражения и прохождения могут носить резонансный характер и, следовательно, необходимо разработать модель работы такой системы.

Представленные на рисунке 4 образцы прошли испытания. Были проведены измерения коэффициентов отражения при их расположении на металлической подложке ($R_{окз}$) и без подложки (R_0). Данные по измерению коэффициентов отражения представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты измерения коэффициента отражения на образце с полным заполнением магнитным микропроводом.

Длина волны, см	$R_{окз}$ (по мощности), %	R_0 (по мощности), %
1	22	22
2	25	25
3	25	25
10	25	25

Отсутствие изменения коэффициентов отражения при изменении длины волны и условий испытания (свободное пространство или короткое замыкание) связано с тем, что образец получился сильно поглощающим в толщине 8 мм.

Аналогичные результаты по коэффициентам отражения были получены при прикладывании образца к раскрыту рупора обеими сторонами. При этом поворот образца на 90° по часовой стрелке или против не изменял полученных результатов. Образец получился изотропен при условии, что в нем присутствуют трещины.

Были проведены измерения коэффициентов отражения для образцов с заполненными жидким стеклом промежутками. Полученные данные представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты измерения коэффициента отражения на образце с частичным заполнением магнитным микропроводом.

Длина волны, см	$R_{окз}$ (по мощности), %	R_0 (по мощности), %
1	< 1	< 1
2	18	18
3	25	25

Следует отметить, что жидкое стекло существенно изменяет радиофизические характеристики образцов. Такое поведение связано, во-первых, с недостаточно отработанной технологией высушивания жидкого стекла (переводом его в стеклообразное состояние) в больших толщинах и, следовательно, сохранением им гидрофильных свойств при термообработке 100 – 130 °С. Оставшаяся в жидком стекле вода является очень хорошим поглотителем электромагнитного излучения. Во-вторых, с тем, что диэлектрическая проницаемость стекла отлична от единицы и длина волны в таком материале в $\sqrt{\epsilon}$ раз меньше, а коэффициент отражения больше из-за рассогласования волновых сопротивлений на границе раздела.

Кроме этого, наличие в образце магнитного материала, также может сказываться на радиотехнику. Поэтому был изготовлен образец с таким же расположением пыжиков, только из медного микропровода.

Данные при размещении медных пыжей на с заполнением промежутков стекловолокном и последующей пропиткой жидким стеклом представлены в следующей таблице 4.

Таблица 4. Результаты измерения коэффициента отражения на образце с частичным заполнением медным микропроводом.

Длина волны, см	$R_{окз}$ (по мощности), %	R_0 (по мощности), %
1	60	1
2	30	4
3	14	27

Из таблицы следует, что при заполнении промежутков между пыжами стекловолокном увеличивается радиопрозрачность материала, однако увеличивается коэффициент отражения на длине волны 3 см, что связано с рассогласованием волновых сопротивлений на границе раздела.

Выводы:

1. Разработаны технологии сборки композиционных материалов на основе микропроводов и получены опытные образцы с полным и частичным заполнением отрезками микропровода, уложенными параллельно вектору распространения электромагнитного поля.
2. Проведены измерения магнитных и диэлектрических спектров магнитных микропроводов в диапазоне длин волн 3 – 30 см. Результаты измерений показали, что диэлектрические потери зависят от ориентации металлической жилы по отношению к вектору распространения электромагнитной волны. Наиболее оптимальным является параллельное расположение металлических жил по отношению к направлению распространения электромагнитной волны.
3. Анализ полученных результатов показывает, образцы с полным и частичным заполнением магнитным микропроводом системы Ni-Cr-Si являются радиопоглощающими в диапазоне длин волн 1 – 10 см.
4. Образцы с частичным заполнением «пыжами» из медного микропровода являются радиопрозрачными на длине волны 1 см и менее при расстоянии между «пыжиками» 1,5 – 2 см.
5. Полученные результаты показывают, что принципиально возможно создание радиопрозрачных композиций на основе медного микропровода для систем поджига топлива, однако это требует дополнительных исследований в направлении оптимизации состава полимерной матрицы и конструкции композита.