

**Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ**

УДК 621.793

**МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, МАГНИТОРЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ЛАВСАНА,  
С УГЛЕРОДНЫМ ПОКРЫТИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО КЛАСТЕРАМИ МЕТАЛЛОВ**  
Анисович А.Г.<sup>1</sup>, Акула И.П.<sup>1</sup>, Жуковский П.В.<sup>2</sup>, Маркевич М.И.<sup>1</sup>, Щербакова Е.Н.<sup>3</sup>, Чекан Н.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Люблинский технический университет  
Люблин, Республика Польша

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Электромагнитное излучение оказывает вредное влияние на здоровье человека. Об этом свидетельствуют медицинские данные и биологических исследований, которые проводятся в мире [1, 2]. Задачи по снижению уровня электромагнитных излучений решаются путем создания радиопоглощающих материалов. Такая задача может быть решена, в частности, нанесением различного рода радиопоглощающих покрытий. Получение радиопоглощающих материалов зависит от многих факторов, в том числе и от способа получения, химического состава покрытия [3–5].

Весьма важным в настоящее время является создание материалов на основе тканых материалов. Синтез таких композиционных материалов и исследование их структуры актуальны с точки зрения практических применений.

Углеродные покрытия используются в оптической промышленности, в полупроводниковых устройствах и т.д. Кроме того, такие покрытия имеют биологическую совместимость и не вызывают токсичных и воспалительных реакций.

В настоящей работе для усиления радиопоглощающих свойств углеродные покрытия были подлегированы кластерами металлов из нержавеющей стали. Для исследования использовалась ткань лавсана производства ООО «Моготекс».

Покрытия наносились на ткань методом импульсного катодно-дугового осаждения в вакууме  $3,5 \cdot 10^{-3}$  Па. Покрытие углерода осаждалось комбинированным PVD-CVD методом. Продукты данного взаимодействия осаждаются на ткани в виде аморфного углерода.

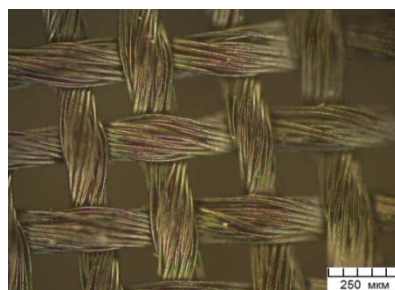
Предварительно перед формированием покрытий поверхность ткани обрабатывалась высокоэнергетическими ионами аргона для удаления органических загрязнений в течение 15 минут при следующих параметрах: давление аргона в вакуумной камере порядка  $3,2 \cdot 10^{-2}$  Па, ускоряющее напряжение 2 000 В, ионный ток (20–40) мА, частота следования импульсов 2,5 Гц. Процесс подлегирования производился в два этапа.

Наносилось покрытие из стали 12Х18Н10Т на ткань методом импульсного катодно-дугового осаждения в среде аргона при давлении

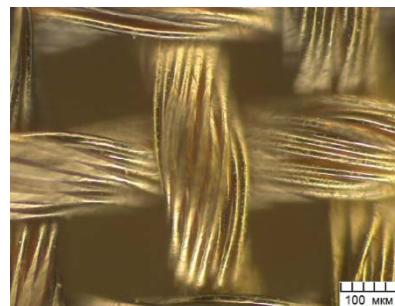
$P = 1,5 \cdot 10^{-2}$  Па. Покрытие осаждалось с использованием источника стационарной металлической плазмы, работающего в режиме сепарации. Процесс проводился путем чередования периодов работы источника плазмы (1 минута) и паузы для охлаждения ткани (1 минута); производилось 20 циклов.

После этого покрытие углерода осаждалось с использованием импульсно-дуговых источников в среде ацетилена при давлении  $P = 0,5$  Па. Было сделано 10000 разрядных импульсов.

Для исследования морфологии поверхности волокна использовали металлографический комплекс на основе инвертированного микроскопа МИ-1 с освещением по методу темного поля [6]. Морфология поверхности ткани с покрытием при различном увеличении представлена на рисунках 1 и 2.



*a*



*б*

Рисунок 1 – Морфология поверхности лавсана с покрытием углерода, подлегированного ионами металлов:

*a, б* – поверхность ткани в темном поле

Использование темнопольного освещения позволяет визуализировать как общую морфологию поверхности, так и отдельное волокно. Темнопольная микроскопия основана на рассеивании света микроскопическими объектами, в том числе теми, размеры которых меньше предела разрешения светового микроскопа.

Свет от осветителя и зеркала проходит через темнопольный конденсор, который формирует световой пучок в виде полого конуса и направляет его на объект наблюдения. Роль конденсора в отраженном свете выполняет эллиптическое зеркало, одетое на оправу объектива. По выходе из конденсора основная часть лучей проходит мимо объектива. Изображение формируется при помощи небольшой части лучей, рассеянных микрочастицами объекта наблюдения внутрь конуса и прошедшими через объектив.

Таким образом, в поле зрения на тёмном фоне видны светлые изображения элементов структуры объекта, отличающиеся от окружающей среды показателем преломления. Принцип формирования изображения при использовании темного поля предполагает освещение объекта полым конусом света; при этом только наклонные участки объекта являются освещенными.

Поверхность объекта в данном случае практически не имеет горизонтальных участков, поэтому в темном поле «светится» каждое волокно. Покрытие лежит равномерно, без заметных отслоений и дефектов. Присутствует каплевидная фаза (рисунок 2).

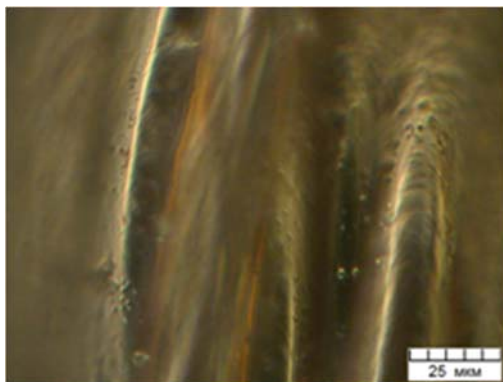


Рисунок 2 – Морфология поверхности лавсана с покрытием углерода, подвергнутого ионной металлизации в темном поле

Исследования магнитного резонанса проводились на специализированном малогабаритном анализаторе ЭМР «Минск 22» при комнатной температуре. Рабочая длина волны – 3 см. Максимальное значение индукции магнитного поля – 450 мТл, частота модуляции – 30 кГц.

На рисунке 3 приведен спектр магнитного резонанса лавсановой ткани с нанесенным углеродным покрытием, подвергнутой кластеризации металлов.

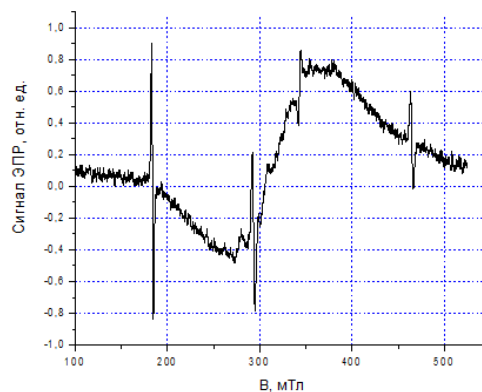


Рисунок 3 – Спектр магнитного резонанса синтезированного композиционного материала

На спектре фиксируется широкая, асимметричная спектральная линия шириной 90,6 мТл с эффективным значением g-фактора  $2,34 \pm 0,01$ , что соответствует высокой концентрации магниторезонансных центров и определяется в основном кластерами металлов (железо, никель, хром и др.). Кроме того на спектре ЭПР просматривается линия от кластеров углерода (узкая спектральная линия с эффективным значением g-фактора  $2,02 \pm 0,01$ , ширина линии составляет 1,7 мТл).

Таким образом, синтезированный композиционный материал обладает магниторезонансным поглощением.

#### Литература

1. Lutsev L.V., Microwave Properties of Granular Amorphous Carbon Films with Cobalt Nanoparticles / L.V. Lutsev, S.V. Yakovlev, T.K. Zvonareva [et.al.] // Journal of Applied Physics. – 2005. – V. 97, №. 10. – P. 104327.
2. Луцев Л.В. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства и применение / Л.В. Луцев, Г.А. Николайчук, В.В. Петров // Нанотехника. – 2008. – № 2(14). – С. 37–42.
3. Адашкевич С.В. Экспресс-диагностика магниторезонансных свойств некоторых порошков ферритов / С.В. Адашкевич, В.Ф. Стельмах, А.Г. Бакаев [и др.] // Электроника – Инфо. – 2016. – № 2. – С. 38–40.
4. Адашкевич С.В. Экспресс-диагностика поглощения СВЧ композиционным материалом на основе гетероцепных волокон / С.В. Адашкевич, А.Г. Бакаев, М.И. Маркевич // Электроника – Плюс. – 2018. – № 2. – С. 60–63.
5. Анисович А.Г. Морфология поверхности и диагностика магниторезонансного поглощения энергии СВЧ лавсана, модифицированного кластерами углерода / А.Г. Анисович, И.П. Акула, М.И. Маркевич / Материалы V Международной научно-практической конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния». – 16–17 мая 2019. – С. 202–203.
6. Анисович А.Г. Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования А.Г. Анисович // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 1. – С. 36–42.