

## АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С ПОВЫШЕННОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ

В авиационной промышленности второй половины прошлого века металлы захватили главенствующую позицию в авиастроении. Но с появлением композитов все изменилось - они стали брать на себя функции металлов. Полимерные композитные материалы имеют ряд преимуществ по сравнению с металлами: легкость, высокая удельная прочность и жесткость, коррозионная стойкость и очень высокие усталостные характеристики [1].

В настоящее время композиты занимают около 50% от всего веса конструкции летательного аппарата (ЛА) (значение варьируется в зависимости от модели ЛА). Однако скорость замены материалов, использовавшихся ранее, на композиты замедлилась. В основном это связано с тем, что многие части ЛА невозможно заменить полимерными композиционными материалами в связи с отсутствием у них необходимых свойств [1], в частности электропроводимости [2]. В некоторых случаях это положительная характеристика, если материал используется как диэлектрик, но создание легкого электропроводящего материала могло бы еще больше раскрыть возможность применения композитов в авиационных конструкциях. Обшивка летательного аппарата помимо высокой прочности и необходимой жесткости должна иметь защиту от молнии, предусматривать снятие статического электрического заряда. Из анализа создания функциональных обшивок, выполняющих роль антиобледенительной системы [3], становится ясно, что вопрос получения электропроводящего слоя, способного равномерно распределять и поглощать заряд (обладающего электроемкостью) в полимерном композиционном материале, является актуальным. При развитии электропроводности и электроемкости можно получить:

- уменьшение веса за счет замены металлических частей (по типу тех, что используются в системах антиобледенения) на электропроводящий композит;
- увеличение свободного пространства в конструкции за счет интеграции проводки в обшивку;
- улучшенные характеристики молниезащиты, противообледенительной и других систем, в основе которых лежит распределение электрического заряда по площади;
- уменьшение цены на производство электропроводящих конструкций из композитных материалов.

На данный момент существует два способа улучшения электропроводности полимерного композиционного материала: внедрение металлических проводов (сеток [4]) из металла в материал или добавление

в связующие металлических частиц [5]. В первом случае электропроводность имеет высокие и стабильные значения, но наблюдается плохая адгезия между металлом и композитом, что в дальнейшем приводит к отслоению электропроводящего металлического слоя. Уменьшение частиц металла и добавление его как порошка в полимерное связующее, а затем совмещение его с армирующим материалом дает невысокие и нестабильные значения электропроводимости.

Создание тонкого электропроводного слоя, где частицы ложатся друг на друга и образуют непрерывный электропроводный слой, возможно за счет применения холодного газодинамического напыления. Данный способ позволяет разогреть металлические частицы, которые соударяясь с материалом, на который напыляются, пластически деформируются и соединяются друг с другом. При этом можно регулировать температуру частиц и скорость их движения таким образом, чтобы не происходило разрушения композиционного материала, на который происходит напыление. Для определения картины распределения электропроводных частиц в композите, их взаимодействия между собой и композитом проводят микроструктурный анализ. Результаты микроструктурного анализа композиционного материала, имеющего металлические слои, нанесенные холодным газодинамическим напылением, представлены в данной работе.

В качестве исходного композиционного материала, на который наносился электропроводный слой, использовались два материала: стеклоткань (Aeroglass 200) и углеткань (CordKarbon 200) на эпоксидном связующем (ЭД-20) с использованием отвердителя (ПЭПА). На предварительно пропитанную связующим стеклоткань или углеткань напылялся порошок меди, затем слои укладывались друг на друга напыленным слоем вверх, вакуумировались и отверждались в печи при температуре 60°C в течение 5 часов. После этого из заготовок были подготовлены образцы, для которых и был проведен анализ структуры: 3 образца стеклопластика, 3 образца углепластика с одинарным напылением и 1 образец углепластика с двойным напыленным слоем (рис. 1). Единичное напыление содержало 1,5% от общего объема материала медного порошка, двойное напыление – 3%.

Для оценки общей картины расположения электропроводного слоя по толщине композита были проведены исследования на оптическом микроскопе, для определения взаимодействия металлических частиц между собой и композитом - на электронном микроскопе. Первичный анализ образцов на основе стеклоткани (рис. 2) показал, что напыленный слой металлического порошка не имеет четко выраженной границы, металл разбросан по поверхности шлифа. Это может быть связано с податливостью стеклоткани и перетеканием связующего при формовании материала и тем самым переносом напыленного материала по всему объему образца.

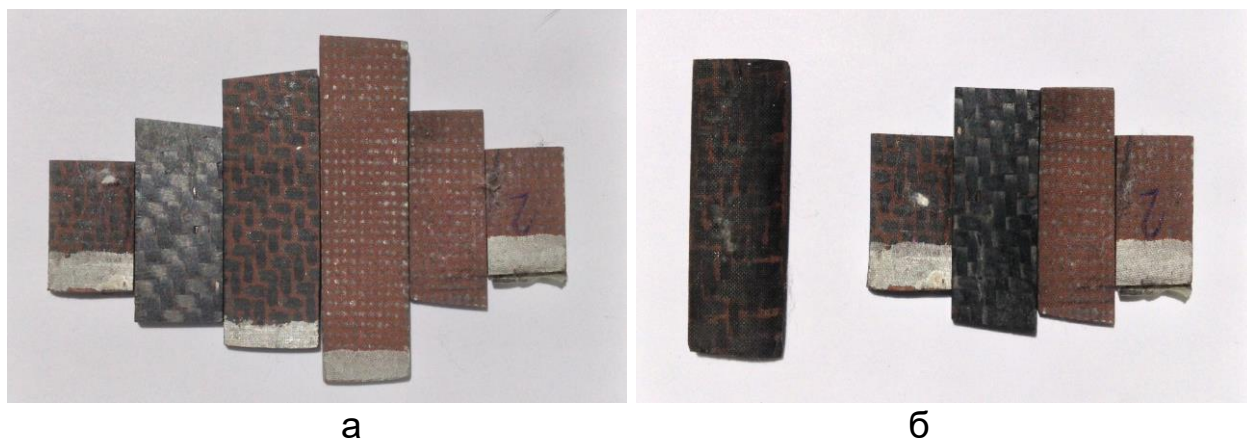


Рисунок 1 – Образцы, которые использовались для анализа структуры модифицированных композитов:  
 а – для оптического микроскопа; б – для электронного растрового микроскопа

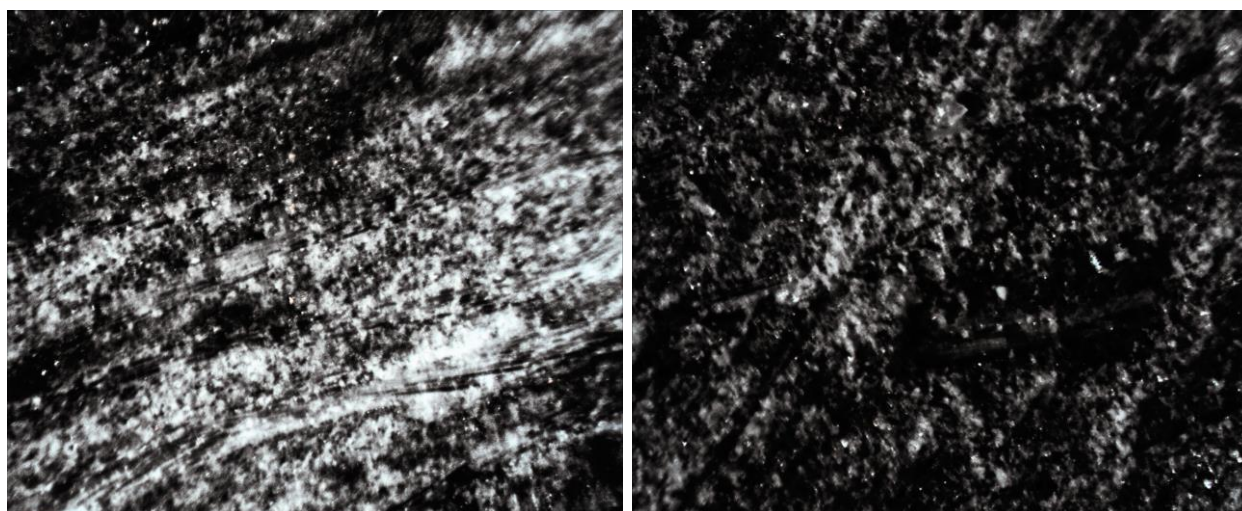


Рисунок 2 – Структура стеклопластика, полученная на оптическом микроскопе, увеличение в 40 раз

Первичный анализ образцов на основе углеткани (рис. 3) показал, что в отличие от стеклоткани у образцов есть четко выраженная граница напыленного медного слоя.

Как итог первого этапа можно отметить:

- Углеткань проявила себя лучше в связи с образованием плотной межслойной структуры (рис. 3).
- Стеклоткань в связи со свойствами материала, а именно меньшей прочностью и плотностью, была не в состоянии образовать электропроводные слои (рис. 2).

При этом стоит заметить, что стеклоткань является диэлектриком, и подобные вкрапления меди (как проводника) по объему материала будут улучшать электропроводность композита, как следует из эксперимента с вкраплениями непроводящих частиц [6].

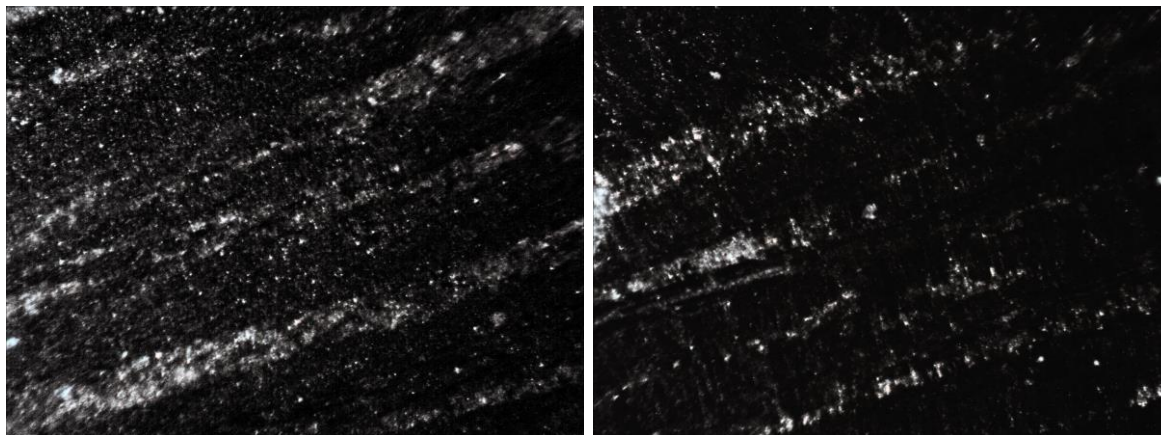


Рисунок 3 – Структура углепластика, полученная на оптическом микроскопе, увеличение в 40 раз

Наиболее простым и дешевым методом повышения электропроводности полимерных композитов является добавление электропроводных частиц в полимерное связующее (наполнения) (рис. 4). Однако стоит учитывать, что простое смешивание порошка меди и полимерного связующего не дает весомых результатов в силу отсутствия структуры, через которую мог бы протекать ток, так как все частицы разбросаны по связующему и каждая из них окружена слоем диэлектрика. Таким образом, для увеличения электропроводности нам необходимо многократное увеличение массы, что уже не отвечает поставленным задачам перед электропроводными композитами [6].

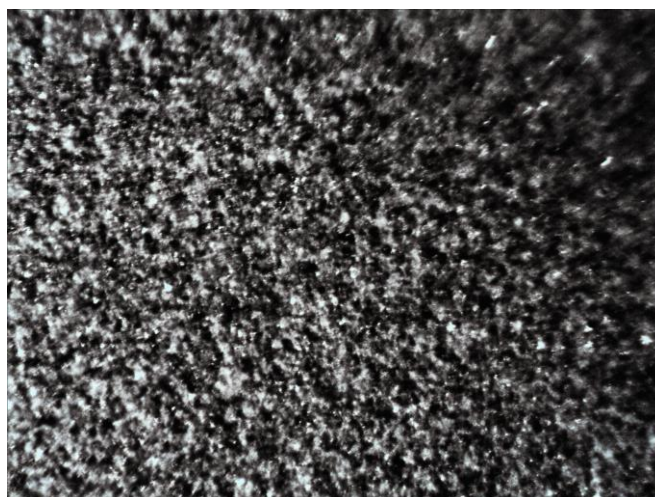


Рисунок 4 – Структура эпоксидного связующего, перемешанного с медным порошком, увеличение в 40 раз

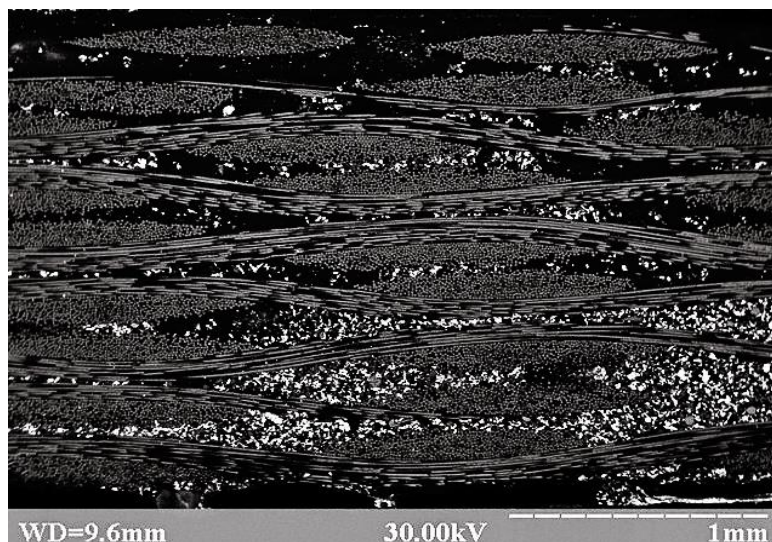
Аналогичная ситуация с электропроводностью возникает в стеклопластике, когда частицы перетекают по объему материала и не образуют сплошного электропроводного слоя.

Для изучения структуры напыленного слоя, а также для подтверждения полученных результатов было решено перейти ко второму эта-

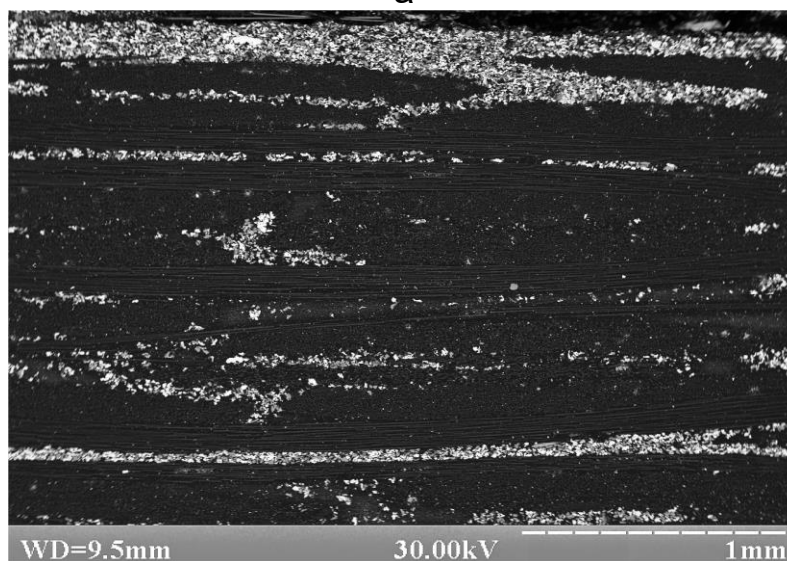


пу: изучение микроструктуры образцов с помощью растрового электронного микроскопа (Микроскоп электронный растровый с камерой низкого вакуума и системой энергодисперсионного микроанализа РЭМ-106).

При исследовании микроструктуры образцов выявлено, что напыленный слой имеет большую разнотолщинность и в некоторых случаях он прерывается (рис. 5).



а



б

Рисунок 5 – Микроструктура, полученная на электронном микроскопе:  
а – для стеклопластика; б – углепластика

При двойном напылении разрывов в электропроводном слое наблюдается меньше, хотя его разнотолщинность остается (рис.б). Это, конечно, будет влиять на электропроводящие свойства получаемого материала. При этом следует отметить, что частицы напыленного материала взаимодействуют друг с другом (рис. 7), что будет повышать электропроводность данного материала по сравнению с простым перемешиванием этого же порошка в полимерном связующем.

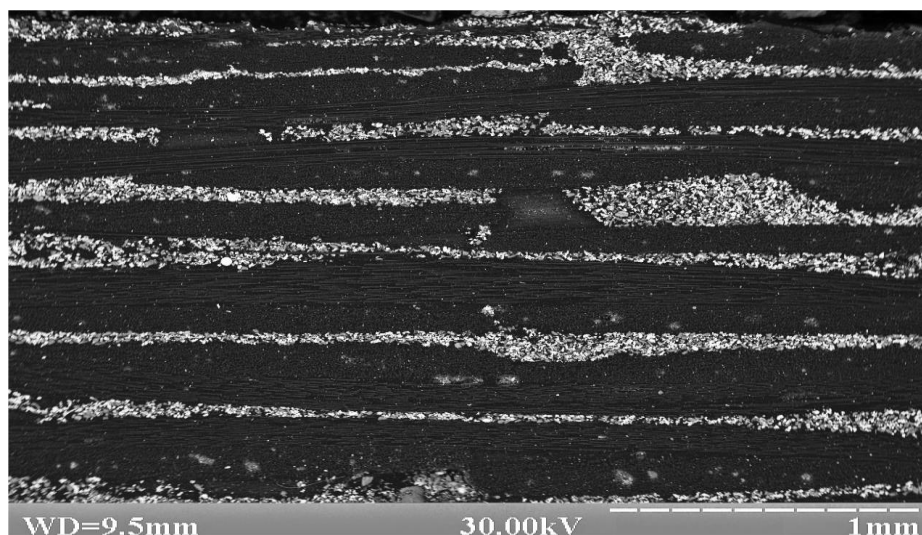


Рисунок 7 – Микроструктура углепластика с двойным напыленным электропроводным слоем

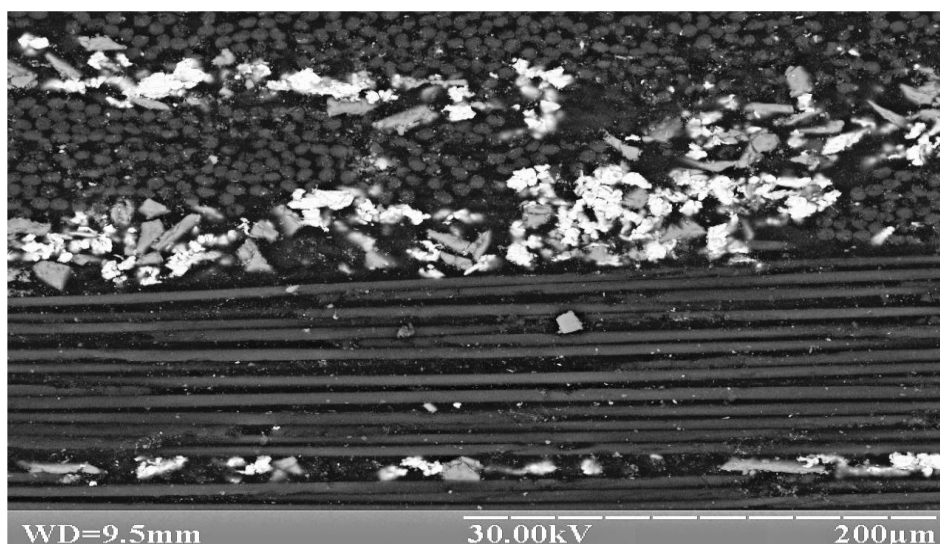


Рисунок 8 – Образованная структура напыленного электропроводного слоя в углепластике

## Выводы

На основе проведенного микроструктурного анализа можно сделать вывод о том, что применение холодного напыления электропроводящего порошка на предварительно пропитанный полимерным связующим армирующий материал: стеклоткань или углеткань позволяет создать непрерывный электропроводный слой. Параметры токопроводящего слоя толщина и равномерность зависят от квалификации оператора, а также вида армирующего материала. При применении податливых материалов напыленный слой может перетекать вместе со связующим при формовании композита, что требует в дальнейшем или применения более вязкого связующего, или снижения давления формования. Электропроводность полученных образцов связана с непрерывностью самого

слоя. В случае рассмотрения углепластика с напыленным слоем (рис. 5) электрический заряд переходит из углерода в металл, из металла в связующее, из связующего в углерод. Переход заряда в связующее приводит к потере электропроводности из-за большого сопротивления самого связующего и образованию локальной области “связующее - металл”. В данной области при большом количестве связующего, превышающего количество металлических частиц, может происходить деструктуризация материала из-за пробоя и перегрева, поэтому отработка технологии холодного напыления для образования непрерывного и равномерного электропроводного слоя должна быть продолжена.

### Список использованных источников

1. Композиционные материалы и история их внедрения в авиационные конструкции [Текст] / Ю.М. Фейгенбаум, С.В. Бутушин, Д. Г. Божевалов, Ю. С. Соколов // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2015. – № 7. – С. 24–36.
2. Результаты исследования авиационных полимерных материалов в условиях, моделирующих воздействие разряда молнии [Электронный ресурс] / Г.А. Акомелков, А.Г. Гуняева., В.М. Куприенко, В.Н. Романцов // V Российская конференция по молниезащите : материалы конф., 17–19 мая 2016 г., г. Санкт-Петербург. – Режим доступа : [http://lightningprotection.ru/?page\\_id=784](http://lightningprotection.ru/?page_id=784). – 01.06.2017.
3. Deicing system protects general aviation aircraft [Electronic resource]. – Access mode: [https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2007/t\\_5.html](https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2007/t_5.html). – 01.06.2017.
4. Вишняков, Л.Р. Исследование возможности молниезащиты полимерных композиционных материалов, армированных медной вязаной сеткой [Текст] / Л.Р. Вишняков, И.И. Чернявский, О.В. Зубков // Вісник інженерної академії України. – 2012. – № 2. – С. 143–148.
5. Srivastava, V.C. Microstructure and electrical conductivity of Al–SiCp composites produced by spray forming process [Text] / V.C. Srivastava, S. N. Ojha // Bulletin of Materials Science. – 2005. – Vol. 28, № 2. – P. 125–130.
6. Chen Pu-woei. Improving the Electrical Conductivity of Composites Comprised of Short Conducting Fibers in a Nonconducting Matrix: The Addition of a Nonconducting Particulate Filler [Text] / Pu-woei Chen, D.D.L. Chung // Journal of Electronic Materials. – 1995. – Vol. 24, № 1. – P. 47–51.

*Поступила в редакцию 20.04.2017.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*