

- [16] The engineering toolbox. Resources, tools and basic information for engineering and design of technical applications. [Online]. Hyperlink: <http://www.engineeringtoolbox.com/>
- [17] Li Y. The mechanical response of an A359/SiCp MMC and the A359 aluminum matrix to dynamic shearing deformations / Y. Li, K. T. Ramesh, E. S. C. Chin // Mater. Sci. Eng., A. – 2004. – vol. 382. – № 1. – p. 162–170.
- [18] Kittel Ch. Introduction to solid state physics / Ch. Kittel. – St. Johnson, ed. – N.Y.: John Wiley & Sons, 2005. – 680 p.
- [19] Huang K. Statistical mechanics / K. Huang. – N.Y.: John Wiley & Sons, 1987. – 506 p.

УДК 620.22-419:621.3.011.2

*Пургина С. М., Смовзюк Л. В., Ставиченко В. Г., Шестаков П. В., Шоринов А. В.*

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт». Украина, г. Харьков

### АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИТОВ С ПОВЫШЕННОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТЬЮ

*В статье рассмотрены актуальные проблемы создания и применения полимерных композиционных материалов с повышенными характеристиками электро- и теплопроводности. Проведен обзор и сравнительный анализ существующих методов получения электропроводных композиционных материалов, оценены их преимущества и недостатки, а также область применения. Предложена новая технология получения композиционных материалов с повышенной электро- и теплопроводностью основанная на использовании процесса холодного напыления металлических частиц на армирующий материал или на готовую конструкцию. Представлены результаты измерений электрической проводимости углероды с напыленными частицами меди.*

*Ключевые слова:* композиционный материал; электропроводность; холодное газодинамическое напыление.

#### Введение

В настоящее время композиционные материалы (КМ) на основе сверхтонких углеродных, стеклянных, органических и других типов волокон в сочетании с полимерными связующими материалами достаточно широко применяются в различных отраслях техники. Наиболее перспективной областью их применения является авиационная и ракетно-космическая техника, где востребованы такие свойства композитов, как высокая удельная прочность и жесткость, а также ряд других уникальных свойств, позволяющих реализовать в конструкции особые качества. К таким свойствам следует в первую очередь отнести свойства, связанные с неметаллической природой композитов, такие как радиопрозрачность, немагнитность, а также диэлектрические свойства некоторых КМ, в частности стеклопластиков.

Однако в некоторых случаях отмеченные выше свойства могут наоборот ограничивать возможность применения КМ в тех или иных конструк-

циях, либо могут потребоваться некоторые дополнительные меры для обеспечения заданных эксплуатационных свойств. Одним из примеров таких случаев является защита летательных аппаратов (ЛА) от негативных последствий удара молнии. Металлические сплавы, используемые в авиационной технике, хорошо проводят электрический ток, поэтому проблема молниезащиты металлических самолетов не стоит особенно остро.

При использовании композитов, которые либо являются диэлектриками (стеклопластики) либо обладают сравнительно низкой электропроводностью (углепластики) требуется применение дополнительных мер, направленных на обеспечения заданного пути распространения электрического тока. В диэлектрических стеклопластиковых конструкциях точкой присоединения молнии могут оказаться металлические элементы расположенные внутри конструкции, а также выступающие шляпки винтов в зоне соединений. В практике эксплуатации самолетов, в которых применяются КМ, были зафиксированы случаи разрушения компо-

зитных элементов вследствие прямого попадания молнии. Также можно отметить, что низкая теплопроводность КМ может являться как положительным свойством в конструкциях, где нужна теплоизоляция, так и отрицательным, там, где наоборот нужен отвод тепла, например в конструкции капота двигателя.

В целом можно отметить, что полимерный композитный материал, обладает рядом ценных конструктивных свойств (малая масса, высокая прочность, коррозионная стойкость и т.д.), однако не может конкурировать с металлами по электро- и теплопроводности. Изменение характеристик полимерного композита до определенных значений физических величин электропроводности и теплопроводности позволит существенно расширить области применения композитов в авиационной и других отраслях техники.

### Перспективные области применения композиционных материалов с повышенной электропроводимостью

Токопроводящие КМ с заданными электрофизическими и теплофизическими характеристиками могут быть успешно применены в системах антиобледенения ЛА в качестве нагревательных элементов. Важное достоинство такого решения заключается в том, что токопроводящие слои КМ будут являться частью несущей конструкции, что позволит эффективно решить проблему обледенения без дополнительного увеличения массы ЛА.

Помимо этого, электропроводящие КМ могут использоваться в качестве нагревательных элементов в конструкции энергосберегающей технологической оснастки с внутренними источниками тепла для формования изделий из полимерных КМ.

Экспериментальные образцы подогреваемой оснастки и термоодеяла, полученные в ходе научно-исследовательской работы выполненной ХАИ на кафедре композитных конструкций и авиационного материаловедения показаны на рис. 1. По результатам исследований [9] применения оснастки с внутренними источниками тепла позволит сэкономить до 60% электроэнергии необходимой для формования композитного изделия по сравнению с традиционным автоклавным методом, что достигается за счет прямого подвода тепла к поверхности формируемого изделия и использования теплоизоляционных слоев на наружных поверхностях оснастки. Главное преимущество использования в качестве резистивного элемента непрерывных токопроводящих слоев КМ перед дискретно расположенными нагревательными элементами заключается, прежде всего, в обеспечении равномерного распределения температуры по поверхности формируемого изделия, что исключает необходимость заглабления резистивных элементов на глубину необходимую для выравнивания температурного поля. Можно ожидать, что применение слоев КМ с повышенными характеристиками электро- и теплопроводности в сочетании со слоями стеклопластика обладающего хорошими электроизоляционными и теплоизоляционными свойствами позволит получать образцы технологической оснастки с исключительно высокими показателями энергоэффективности.

Среди других перспективных областей применения токопроводящих КМ следует отметить системы защиты ЛА от разрушающих последствий попадания молнии. Ввиду недостаточной электропроводности традиционных КМ необходимо применение дополнительных конструктивных элементов для снятия заряда. В частности в конструкциях современных самолетов используются токопрово-

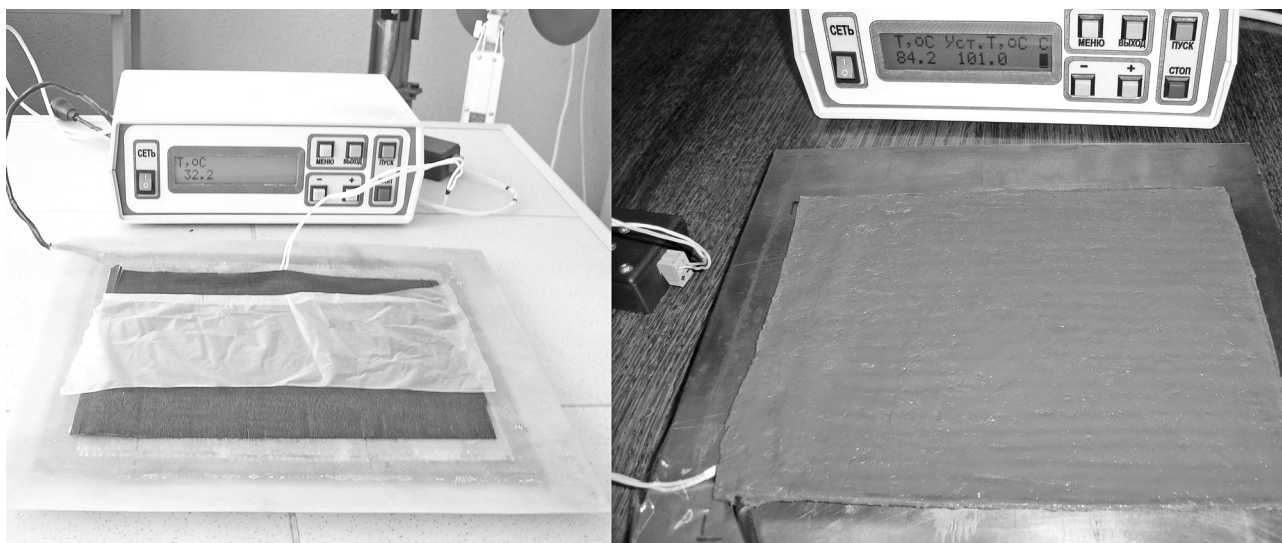


Рис. 1. Экспериментальные образцы оснасток с внутренними источниками тепла

дающие полосы в сочетании с металлической сеткой. Такое решение показало свою работоспособность, однако ввиду наличия ряда проблем актуальным является поиск новых способов обеспечения молниезащиты композитных ЛА.

Помимо сказанного, можно отметить возможность применения электропроводных КМ для экранирования электрорадиооборудования от воздействия электромагнитных полей, а также использование их в системах эксплуатационной диагностики состояния конструкции.

Подводя итог, можно сказать, что электропроводящие КМ могут найти достаточно широкую область применения в различных отраслях техники, что делает актуальным выполнение работ в данном направлении.

### **Обзор методов получения композиционных материалов с повышенными характеристиками электропроводности**

В зависимости от области применения, композит должен обладать электропроводящими способностями либо по всему объему материала изделия, либо только на поверхности или же на определенной глубине композитного изделия. При этом независимо от способа получения материала необходимо сохранить высокие показатели прочности композита. В любом случае, изменение остальных свойств материала должно быть контролируемым и прогнозируемым.

В настоящее время известны следующие способы получения КМ с повышенной электропроводностью.

Наиболее простым способом обеспечения повышенных характеристик электропроводности композита, является введение токопроводящих частиц в полимерное связующее. В качестве таких частиц могут применяться металлические порошки, короткие токопроводящие волокна (например, углеродные), а также частицы в виде углеродных нанотрубок, нановолокон и др. Такой способ обеспечивает электропроводность композита по всему объему и во всех направлениях. Его эффективность во многом зависит от размера используемых частиц. Применение достаточно крупных частиц, не позволяет получить высокие показатели электропроводности и высокую надежность полученных изделий. Поскольку между дисперсными частицами, отсутствуют прямые пути передачи электрического тока, возникает пробой диэлектрика (полимерное связующее) что приводит к локальному перегреву материала и постепенному его разрушению. Применение малоразмерных токопроводящих частиц дает несколько лучшие результаты [3].

В целом же можно отметить, что данный метод не позволяет получать материалы с высокими пока-

зателями электропроводности. Кроме того введение дисперсных частиц в полимерное связующее может существенно повысить его вязкость, что может затруднить реализацию многих технологических процессов изготовления композитных конструкций (например пропитки под давлением или вакуумом). Помимо этого наличие дисперсных частиц может снизить прочностные характеристики матрицы и прочность ее сцепления с волокнами, что может негативно повлиять на прочность и ресурс всей конструкции.

Другим способом получения токопроводящих КМ является введение токопроводящих слоев в процессе выкладки композитной детали. В качестве таких слоев чаще всего используются металлические сетки на основе сплавов меди. Упомянутый метод часто применяется в системе молниезащиты самолета. Металлическая сетка обеспечивает создание поверхностного токопроводящего слоя для отвода заряда молнии. Помимо сетки применяются также ткани на основе тонкой металлической проволоки и армирующие материалы с вплетенной проволокой.

Недостатком упомянутого способа является возможность создания только поверхностного токопроводящего слоя. В связи с этим возникают трудности при обеспечении трансверсальной проводимости материала, и при отводе заряда с поверхностного слоя изолированных элементов конструкции самолетов (крышки люка, створки шасси и др.) на другие элементы системы молниезащиты самолета.

Сравнительно новым методом получения КМ с повышенными характеристиками электро- и теплопроводности является метод напыления токопроводящих частиц на армирующий материал или на готовую конструкцию.

Поверхностный слой на изделие из металлического сплава наносится газопламенной или плазменным способом, путем наплавки частиц металлического порошка на подложку [1, 2]. Но при напылении металлических частиц горячим способом целостность композитной подложки на основе полимерного связующего нарушается, кроме того стеклянные волокна плавятся, органические и углеродные при температуре выше 400°C становятся химически активными, окисляются и прочность полимерной основы волокна снижается [3, 4]. Для плазменного способа напыления нужны специальные камеры, что делает такой процесс энергоемким и ограниченным по размеру зоны напыления. Таким образом, применение горячих способов напыления в большинстве случаев ограничено для композитных изделий.

В случае, когда необходимо сохранить прочностные свойства композита и повысить его электро- и теплопроводные характеристики рациональ-

но использовать холодное напыления электропроводящих частиц [5–8]. Сцепление частиц с подложкой происходит за счет пластического деформирования ударом о подложку предварительно разогнанных частиц порошка. Технология холодного напыления покрытий с заданными свойствами и оборудования для его осуществления на данный момент в странах Европы и США находится только на начальной стадии разработки.

Технология холодного напыления металлических частиц, адаптированная для нанесения равномерного покрытия на армирующие материалы для КМ в настоящее время разрабатывается в ХАИ сотрудниками кафедр Композитных конструкций и авиационного материаловедения и Технологий производства авиационных двигателей. В следующем разделе представлены некоторые результаты начального этапа экспериментальных исследований влияния напыления на электрическое сопротивление армирующего материала.

### Результаты экспериментальных исследований

Для проведения эксперимента были использованы образцы углеленты (рис. 2). При линейной плотности ленты 800 текс и плотности углеволокна 1700 кг/м<sup>3</sup>, площадь сечения пучка волокон составляет 0,68 мм<sup>2</sup>.

На образцы углеленты производилось напыление медного порошка холодным способом. Массовая доля напыщенных частиц определялась путем взвешивания чистых образцов и образцов с напылением. Электрическое сопротивление измерялось универсальным измерителем RLC на длине 110 мм. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что снижение электрического сопротивления при исследуемых массовых долях напыления является незначительным, что помимо малых объемов напыленных частиц можно также объяснить неоднородностью покрытия вызванного несовершенством имеющейся технологии. Несмотря на

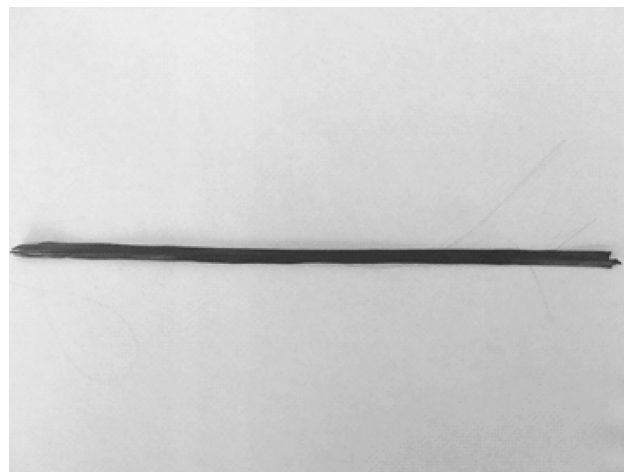


Рис. 2. Вид образца для испытаний

ограниченность проведенного экспериментального исследования, можно отметить наличие тенденции к увеличению токопроводимости армирующего материала. Следовательно, совершенствование технологии холодного напыления является наиболее актуальным направлением дальнейших исследований.

### Выводы

Таким образом, разработка технологии получения КМ с повышенными характеристиками электро- и теплопроводности является перспективным направлением расширения области их применения в различных отраслях техники. При этом существующие в настоящее время способы управления значениями электро- и теплопроводности имеют ряд недостатков и ограничений, что делает актуальным разработку новых технологий получения КМ с вышеупомянутыми свойствами. Технологию холодного напыления токопроводящих частиц на армирующий материал можно выделить как наиболее перспективную для достижения поставленной цели.

Проведенные на начальном этапе выполнения научно-исследовательской работы по разработке

Таблица 1

### Результаты электрических испытаний образцов углеленты с напылением

№ образца	Масса, г	Массовая доля напыления, %	Сопротивление R, Ом	Длина L, мм	Площадь сечения A, мм <sup>2</sup>	Удельное сопротивление ρ, Ом·мм <sup>2</sup> /м
1 (без напыления)	0,14	0,0	3,75	110	0,68	23,2
2	0,144	2,9	3,47	110	0,68	21,5
3	0,1457	4,1	2,72	110	0,68	16,8



технологии получения КМ с повышенными характеристиками электро- и теплопроводности эксперименты показали возможность управления вышеупомянутыми свойствами материала, что дает основание для дальнейших исследований в данной области.

### Литература

- [1] Sahar Abuali Galedari, Advanced Microscopic Study of Suspension Plasma-Sprayed Zirconia Coatings with Different Microstructures / Sahar Abuali Galedari, Mehdi Salimi Jazi, Fardad Azarmi, Xiangqing Tangpong, Ying Huang // Applied Ceramic Technology. – November 2015, – pp. 78–92.
- [2] Willem M. Albers, Effects of Compression and Filler Particle Coating on the Electrical Conductivity of Thermoplastic Elastomer Composites / Willem M. Albers, Mikko Karttunen, Lisa Wikström.
- [3] Ханчич О. А. Наночастицы и надмолекулярная структура полимера / Ханчич О. А., Кузнецова С. А. // Cloud of science. – № 1, 2013. С. – 30–32.
- [4] Todd D. Prichard, Comparison of flocculated and dispersed single-wall carbon nanotube-based coatings using nonionic surfactants (University of Akron) / Todd D. Prichard, Bryan D. Vogt // Polymer Engineering and Science. – 53(1), 2013. – pp. 213–320.
- [5] D. MacDonald, Effect of Nozzle Material on Downstream Lateral Injection Cold Spray Performance / D. MacDonald, S. Leblanc-Robert, R. Fernández, A. Farjam, B. Jodoin // Thermal Spray Technology. – June 2016, pp. 1–9.
- [6] D. J. Helfritsch, Electromagnetic interference shielding by cold spray particle deposition. The cold spray materials deposition process / D. J. Helfritsch // Fundamentals and applications. – 2015, – Vol. 3. – pp. 315–326.
- [7] Giraud D., Polymer metallization using cold spray: Application to aluminum coating of polyamide / Giraud D., F. Borit, V. Guipont // International thermal spray conference ITSC 2012, ed. R. S. Lima, pp. 265–270.
- [8] Jon Affi, Fabrication of Aluminum Coating onto CFRP Substrate by Cold Spray / Jon Affi, Hiroki Okazaki, Motohiro Yamada and Masahiro Fukumoto // Materials Transactions. – 2015. – №. 9. – pp. 1759–1763.
- [9] Смовзюк Л. В. Исследование влияния параметров расслоения на несущую способность панелей из композиционных материалов / Л. В. Смовзюк // Вопросы проектирования и производства. – 2010. – Вып. 1. – С. 58–68.
- [10] Пургина С. М. Подогреваемая формообразующая оснастка регламентированного качества для изготовления композиционных изделий / С. М. Пургина // Вопросы проектирования и производства. – 2010. – Вып. 1. – С. 74–78.

*Purgina S. M., Smovzyuk L. V., Stavichenko V. G., Shestakov P. V., Shorinov A. V.*

National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». Ukraine, Kharkov

### ANALYSIS OF THE PROBLEM OF PRODUCING AND APPLICATION OF COMPOSITES WITH INCREASED ELECTRICAL CONDUCTIVITY

*The article deals with actual problems of creation and application of polymer composite materials with high electrical and thermal conductivity characteristics. A review and comparative analysis of existing methods for producing electrically conductive composites evaluated their advantages and disadvantages, as well as the area of application is presented. A new technology for production of composite materials with high electrical and thermal conductivity based on the use of cold spraying process metal particles to the reinforcing material or of the finished structure is proposed. The electrical conductivity measurement results for carbon type with sprayed copper particles are presented.*

*Keywords:* composite material; electrical conductivity; cold gas-dynamic spraying.

### References

- [1] Sahar Abuali Galedari, Advanced Microscopic Study of Suspension Plasma-Sprayed Zirconia Coatings with Different Microstructures / Sahar Abuali Galedari, Mehdi Salimi Jazi, Fardad Azarmi, Xiangqing Tangpong, Ying Huang // Applied Ceramic Technology. – November 2015, – pp. 78–92.

- [2] Willem M. Albers, Effects of Compression and Filler Particle Coating on the Electrical Conductivity of Thermoplastic Elastomer Composites / Willem M. Albers, Mikko Karttunen, Lisa Wikström.
- [3] Khanich O. A. Nanoparticles and molecular structure of polymer / O. A. Khanich, S. A. Kusnetsova // Cloud of science. – № 1, 2013. P. – 30–32.
- [4] Todd D. Prichard, Comparison of flocculated and dispersed single-wall carbon nanotube-based coatings using nonionic surfactants (University of Akron) / Todd D. Prichard, Bryan D. Vogt // Polymer Engineering and Science. – 53(1), 2013. – pp. 213–320.
- [5] D. MacDonald, Effect of Nozzle Material on Downstream Lateral Injection Cold Spray Performance / D. MacDonald, S. Leblanc-Robert, R. Fernández, A. Farjam, B. Jodoin // Thermal Spray Technology. – June 2016, pp. 1–9.
- [6] D. J. Helfritch, Electromagnetic interference shielding by cold spray particle deposition. The cold spray materials deposition process / D. J. Helfritch // Fundamentals and applications. – 2015, – Vol. 3. – pp. 315–326.
- [7] Giraud D., Polymer metallization using cold spray: Application to aluminum coating of polyamide / Giraud D., F. Borit, V. Guipont // International thermal spray conference ITSC 2012, ed. R. S. Lima, pp. 265–270.
- [8] Jon Affi, Fabrication of Aluminum Coating onto CFRP Substrate by Cold Spray / Jon Affi, Hiroki Okazaki, Motohiro Yamada and Masahiro Fukumoto // Materials Transactions. – 2015. – №. 9. – pp. 1759–1763.
- [9] Purgina S. M. Specified quality heated shape-generating molding tools for composite product manufacturing / S. M. Purgina // Issues of design and manufacture of flying vehicles. – 2010. – V. 1. – P. 74–78.

УДК 678.067:539.538

Вишняков Л. Р.<sup>1</sup>, Морозова В. Н.<sup>1</sup>, Варченко В. Т.<sup>1</sup>, Мороз В. П.<sup>1</sup>, Тульженкова А. С.<sup>2</sup>, Сичкарь Т. Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Украина, г. Киев

<sup>2</sup> Национальный педагогический университет им. И. П. Драгоманова. Украина, г. Киев

## ОБ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ «ВТОРИЧНЫХ» ЭПОКСИПОЛИМЕРОВ С НАПОЛНИТЕЛЯМИ ИЗ ОТХОДОВ УГЛЕПЛАСТИКОВ

*Проведены эксперименты по изготовлению «вторичных» эпоксиполимеров с наполнителями из дисперсных отходов механической обработки конструкционных углепластиков. Установлено, что при объемной доле наполнителя в виде дисперсных частиц углепластиков с содержанием 18 мас.% «вторичный» композит (карбопластик) приобретает повышенную износостойкость. Вид углеродных волокон, из которых образуются дисперсные отходы и условия работы пары трения, существенно влияют на уровень износостойкости и значения коэффициента трения «вторичных» композитов.*

*Проведена оценка триботехнических, теплофизических и механических свойств «вторичных» композитов. Перспектива промышленной утилизации дисперсных частиц углепластиков в качестве наполнителей полимерных материалов трения связана с необходимостью сбора, классификации, изготовления и адресного применения этих материалов.*

*Ключевые слова:* углепластики; отходы; утилизация; износостойкость; «вторичный» композит.

### Введение

Проблема утилизации отходов углепластиков и, в особенности, армированных углеродными волокнами (УВ) полимерных конструкций для самолетов и ветролопастей, является весьма острой. Так, мировые производители авиационной техники

наращивают производство самолётов, где используются углепластики. При этом возрастают объемы механообработки деталей из углепластиков с накоплением количества дисперсных отходов, требующих очистки и вентиляции рабочей зоны, сбора, хранения и экологических мероприятий. Важной проблемой является также утилизация