

УДК 629.7.063.6

Вишняков Л.Р.

Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины. Украина, г. Киев

ВЯЗАНО-ПАЯНЫЕ МЕДНЫЕ СЕТКИ И УГЛЕРОДНЫЕ НАНОСТРУКТУРНЫЕ ЧАСТИЦЫ ДЛЯ МОЛНИЕЗАЩИТЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ: ОПЫТ АВИАСТРОЕНИЯ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

На основании опыта применения в авиационной технике разработаны медные вязаные и вязано-паяные сетки, использование которых за счет улучшения диссипативных свойств позволяет уменьшить площадь деструкции панели и расслоения композиционного материала. Предложены углеродные электропроводные наноструктурные модификаторы полимерной матрицы для повышения электропроводности в ламинатах углепластика и повышения адгезии между углеродными волокнами и связующим. Предложено использовать вязано-паяные медные сетки для усовершенствования системы молниезащиты ветролопасти: молниеулавливатель и токоотвод (шинопровод). Результаты работы рекомендуются для эффективной комплексной защиты ветролопастей от молнии.

Ключевые слова: полимерные композиты; связующее; вязано-паяные сетки; наноструктурные частицы; молниезащита.



Рис. 1. Возможные последствия разрушения лопастей ветроэнергетического агрегата

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) наибольшее применение находят в авиационной и ветроэнергетике. Как для современных самолётов, где применение углепластиков достигает уже 50% массы конструкции, так и для мощных ветроагрегатов с лопастями длиной 80–100 м, особенно для офшорных (прибрежных) условий эксплуатации, остро стоит вопрос об эффективной молниезащите. При попадании молнии в конструкцию из композиционного материала возникает нагрев который, сопровождается деструкцией композита, а давление образовавшихся газов приводит к расслоению и разрушению конструкций из ПКМ. Ветролопасть может загореться в точке привязки молнии, что вызывает опасность полного уничтожения дорогостоящего ветрогенератора (рис. 1).

Следует отметить, что молниезащита ПКМ не является новой задачей: в авиационной применяют средства поверхностной металлизации (сетки, фольги, напылённые металлизированные слои), а в ветролопастях — используют стержневые и ленточные металлические токоотводы, которые электрически связаны с заземлением ветроагрегата.

Способы молниезащиты авиационной техники во многом зависят от особенностей конструкции самолета, технико-экономических факторов, опыта и предпочтений разработчиков летательных аппаратов.

Цель работы

Целью работы является использование опыта разработки систем молниезащиты авиационных конструкций для применения в ветроэнергетике.

Концепция и разработка технических решений

В ветроэнергетике существуют и применяются международные и национальные стандарты молниезащиты лопастей [1], которые регламентируют использование конкретного материала (как правило, металла) в конструкциях молниеотводов.

Практика изготовления и эксплуатация деталей из композитов показывает, что системы их молниезащиты требуют усовершенствования прежде всего для локализации и минимизации последствий повреждения ПКМ. Средства молниезащиты должны иметь высокую теплопроводность, электропроводность, технологичность, а также обладать диссипативной способностью. Наш опыт разработки и применения вязаных и вязано-паяных медных сеток в самолетостроении показал, что разрушающее влияние удара молнии существенно снижается, когда в результате нагрева неразъемные паяные контакты между петлями сеток ослабляются и разрываются. Эффективному рассеиванию энергии способствует также испарение припоя из мест контакта проволочных петель и с поверхности проволок [2].

Следует отметить, что в ветроэнергетике вязано-паяные сетки еще не нашли достаточного применения. Между тем эффект диссипации энергии при использовании в качестве токоотводов вязано-паяных сеток, по нашему мнению, заслуживает особого внимания и использования в изделиях из композитов, которые выпускают мировые компании-производители ветроагрегатов. Отметим главное отличие молниезащиты ветролопастей от технических решений при защите самолета от удара молнии. Если в авиации существуют жесткие весовые огра-

ничения (в том числе и по весу токоотводящих сеточных покрытий), то в ветроэнергетике эти ограничения не столь жестки. В ветролопастях, чтобы пропускать значительные количества электричества, особенно при безопасном его проведении от места поражения молнии к заземлению ветроагрегата, необходимо увеличивать сечение токоотводящего сетчатого полотна, а значит — и его массу. Увеличения сечения сетчатого полотна можно достичь двумя путями: либо созданием более густой сетки с большим числом петель, расположенных на единице площади полотна, либо увеличением количества проволок в пучке, который образует переплетение сетки. В принципе, допускается сочетание и первого, и второго способа увеличения поперечного сечения сетки, через которую будет отводиться ток.

Для повышения электропроводимости молниезащитных сеток важное значение имеет качественная пайка смежных петель в сетчатых полотнах. Она проводится по специальной технологии с помощью последовательной шаговой пропайки сетчатого полотна по всей его площади. При этом применяют расплавленный припой, дополнительно вносимый в зону пайки. Следует отметить, что количество вносимого припоя должно быть ограничено, поскольку его чрезмерное увеличение приводит к нежелательному повышению удельного поверхностного сопротивления (например, электросопротивление припоя ПОС-61 превышает сопротивление меди примерно на порядок).

Нашими работами было установлено, что для самолетостроения рекомендуются вязано-паяные сетки из медной проволоки диаметром 0,08 и 0,12 мм (табл.1). Для потребителей налажен серийный выпуск и поставка следующих полотен (из проволоки, покрытой оловянно-свинцовым припоем ПОС-61 ГОСТ 1499-54 и из медной проволоки диаметром 0,12 мм, покрытой тем же припоем. На рис. 2 показаны фотографии вязано-паяных сеток. Если для самолетостроения по комплексу характеристик

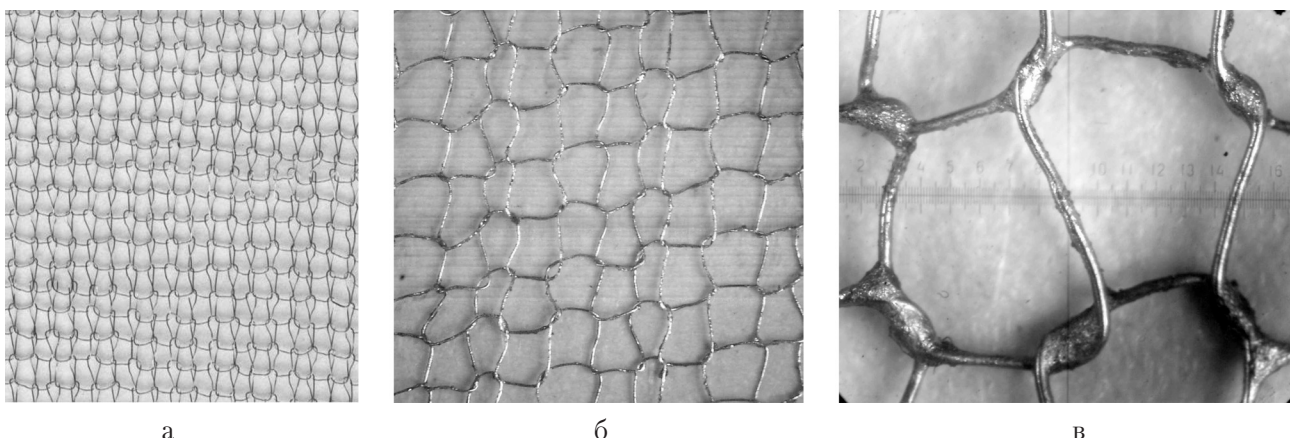


Рис. 2. Вязаные и вязано-паяные сетки из медной проволоки для молниезащиты авиационных конструкций: а — вязаная сетка; б — вязано-паяная сетка; в — петельные ячейки



Таблица 1.

Свойства молниезащитных сеток треугольной структуры из медных проволок

Диаметр проволоки, мм	класс оборудования	тип сетки	Структура сеток		количество проволок в пучке, шт.	поверхностная плотность сетки, г/м ²	толщина сетки, мм	Механические свойства проволок в пучке		Механические свойства сеток				Удельное поверхностное электрическое сопротивление сеток, мОм		
			Прочностные свойства сеток					Деформационные свойства сеток		коэф-т анизотропии прочности сетки, K _c	относительная деформация полоски сетки шириной 50 мм при разрыве, %	коэф-т анизотропии деформации сетки, K _d	вдоль петельных столбцов	поперек петельных столбцов	вдоль петельных столбцов	поперек петельных столбцов
			разрывное усилие проволоки в пучке, Н	относительная деформация в пучке при разрыве, %				разрывное усилие полоски сетки шириной 50 мм, Н	разрывное усилие полоски сетки шириной 50 мм, Н							
0,08	10	вязаная	1*	70	0,15	1,25	22,4	17,8	14,6	1,22	70,4	170,5	0,41	17,4	12,3	
			2	165	0,16	2,55	26,7	32,6	33,5	0,97	105,7	208,8	0,50	13,9	6,0	
			3	275	0,20	3,30	28,5	59,5	62,4	0,95	130,4	255,6	0,51	10,2	2,6	
		вязано-паяная	1*	85	0,3	-	-	35,4	27,3	1,30	15,2	36,3	0,38	4,9	6,7	
			2	190	0,32	-	-	68,2	53,6	1,27	19,5	40,2	0,48	1,8	2,3	
			3	310	0,36	-	-	94,7	80,7	1,17	22,3	46,4	0,48	1,2	1,7	
0,12	8	вязаная	1	145	0,21	3,25	12,2	34,3	25,3	1,36	117,6	180,5	0,65	16,3	6,4	
			2	320	0,25	6,20	16,7	68,7	57,6	1,19	170,8	250,7	0,68	12,2	3,5	
			3	485	0,35	9,20	19,5	102,6	89,7	1,14	230,5	290,4	0,79	9,4	2,5	
		вязано-паяная	1*	155	0,32	-	-	45,5	38,5	1,18	18,3	16,8	1,08	2,7	3,5	
			2	335	0,38	-	-	90,3	80,6	1,12	32,4	33,5	0,97	1,5	2,0	
			3**	520	0,45	-	-	120,7	108,4	1,11	40,6	45,7	0,89	1,0	1,2	

Примечание: * — изготавливается по технической документации

** — разрабатывается техническая документация

K_c — определяется как отношение разрывных усилий сетки вдоль петельных столбцов к разрывному усилию поперек петельных столбцовK_d — определяется как отношение относительной деформации сетки вдоль петельных столбцов к относительной деформации поперек петельных столбцов.

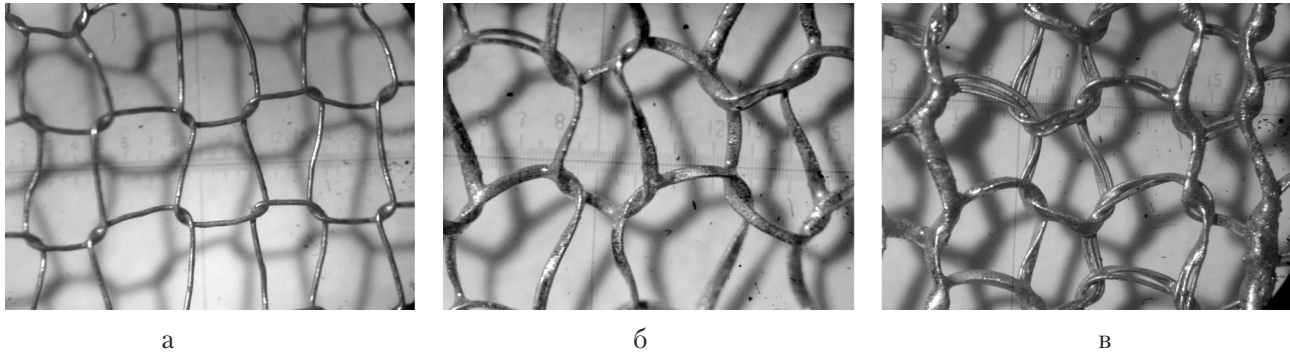


Рис. 3. Вязано-паяная сетка из медной проволоки $\varnothing 0,12$ мм с разным количеством проволок в пучке: а – одна проволока; б – две проволоки; в – три проволоки

(вес 1 кв. м, удельное поверхностное электросопротивление) были рекомендованы однопроволочные сетки, то для ветролопастей применимы сетки с 2-мя и 3-мя нитями в пучке при одинаковом строении металлотрикотажа переплетения «ластик 1×1» (рис. 3). Особенностью строения молниезащитных сеток является анизотропия механических свойств и электропроводности (табл. 1), которую необходимо учитывать при проектировании систем молниезащиты конструкций из ПКМ.

Зависимость удельного электросопротивления молниезащитных сетчатых полотен от поверхностной плотности (рис. 4) показывает, что путём оптимизации режимов операции пропайки и количества медных проволок в пучке, образующем петли, можно уменьшить удельное поверхностное электросопротивление до необходимого значения.

На основании полученных экспериментальных данных (табл. 1) для ветролопастей нами рекомендуются вязано-паяные сетки из 2-х и 3-х проволок диаметром 0,12 мм. Такие сетки в составе панелей из композиционных материалов прошли стендовые испытания на сертифицированном стенде в НИПКИ «Молния» НТУ ХПИ, г. Харьков. Образцы панелей после испытаний (рис. 5) свидетельствуют о положительном влиянии поверхностного армирования сеткой: существенно снижены площадь и глубина зоны разрушения по сравнению с незащищёнными панелями [3, 4].

Одной из особенностей системы молниезащиты в ветроэнергетике является реализация безопасного отвода в землю больших электрических зарядов, которые сопровождают прямой удар молнии.

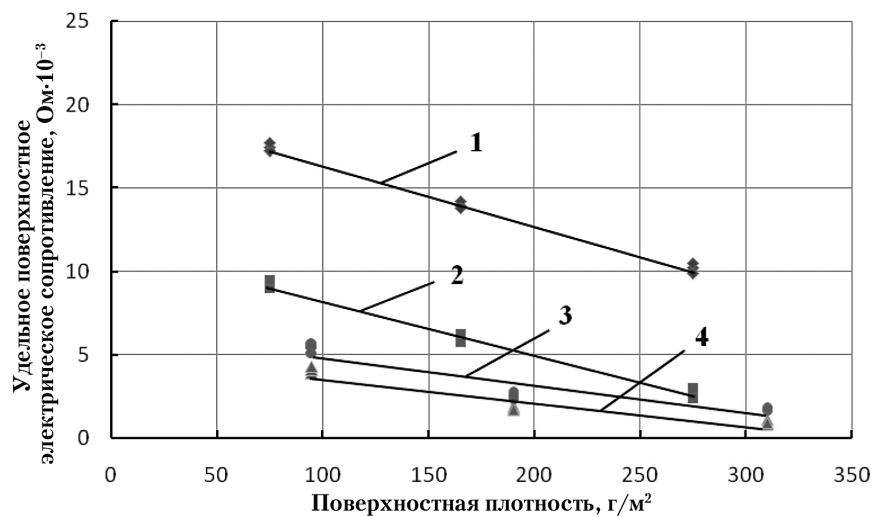


Рис. 4. Зависимость удельного поверхностного сопротивления вязаных (1,2) и вязано-паяных (3,4) сеток от поверхностной плотности: а – диаметр медной проволоки 0,08 мм; б – диаметр медной проволоки 0,12 мм; 1, 4 – вдоль петельных столбцов; 2, 3 – поперек петельных столбцов

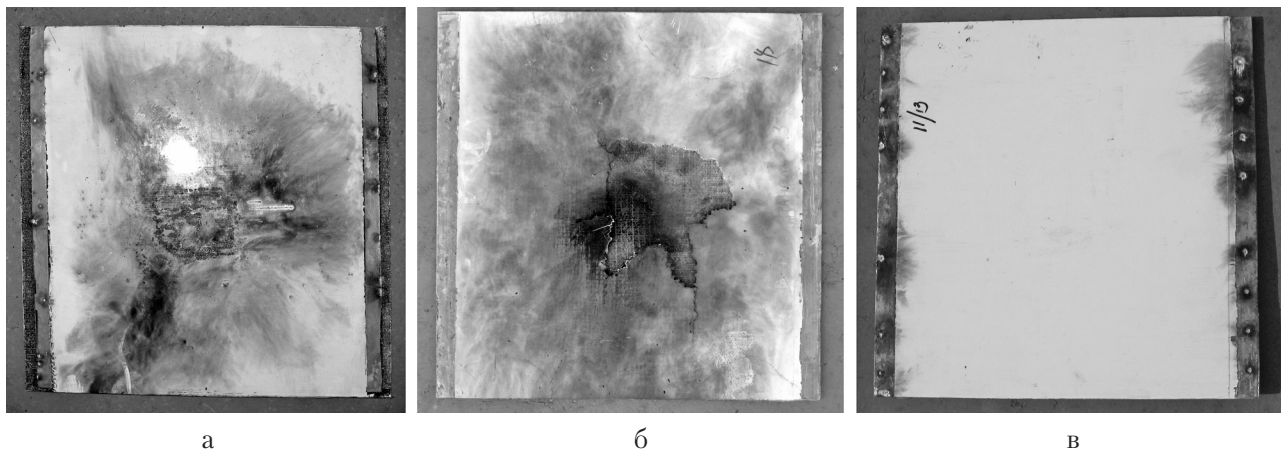


Рис. 5. Фотографии панелей после разрядных испытаний:

а – панель без молниезащиты, сквозной пробой;

б – использована молниезащитная сетка, панель имеет повреждение наружного покрытия: глубина 0,5 мм площадь 90 см².

в – использована комплексная молниезащита (сетка и углеродные наноструктурные частицы), пробой отсутствует

Токоотводящая шина, соединяемая с землей, должна располагаться в объеме полимерного композита (материала ветролопасти). В технических требованиях международного стандарта [1] приведены примеры исполнения таких шин (стержни, сетки, металлические полосы) и размеры их поперечного сечения для разных металлов – меди, алюминия и стали. Наше предложение сводится к тому, чтобы токоотводящую шину изготавливать из нескольких слоев вязаной сетки. Таким образом, удастся выполнить требования стандарта относительно электросопротивления токоотводов и одновременно предложить пористую структуру шиноотвода, который обладает высокой технологичностью: будучи эластичным, он располагается в лопасти любой кривизны, а пористость и рельефность шины способствуют её хорошей приформовке к материалу полимерного композита.

Итак, для улавливания заряда молнии, попавшего в ветролопаст, служит сетка, которая покрывает поверхность лопасти в один слой, а для отвода зарядов в землю мы рекомендуем многослойную шину шириной, например, 300-400 мм. При этом шина заземления заформована в поверхность углепластика по всей длине лопасти и электрически соединена с однослойной сеткой улавливателя молнии. Таким образом, используя вязаные и вязано-паяные сетки, можно усовершенствовать систему молниезащиты ветролопастей из композиционных материалов.

Другим эффективным средством защиты полимерных композитов от ударов молнии, которые мы рекомендуем для авиационной техники наряду с сетками, являются электропроводящие наноструктурные углеродные частицы (рис. 6).

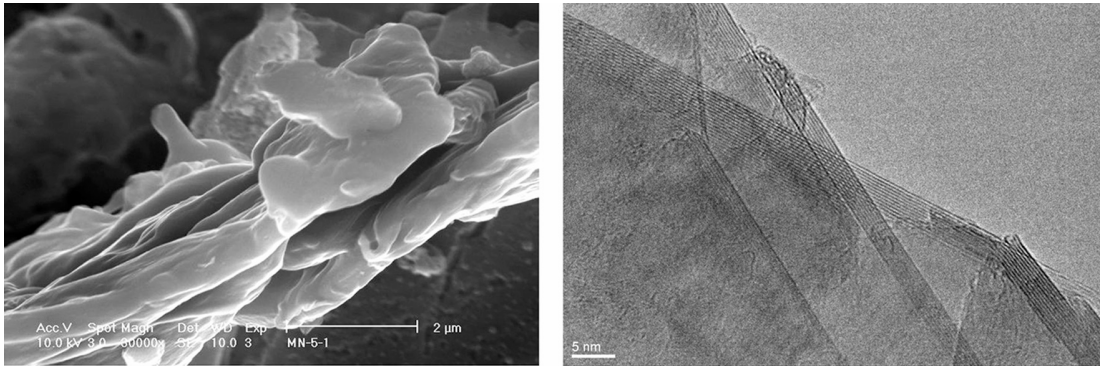
Некоторые из них изготавливаются из сырья растительного происхождения, например, стружки сосны [5]. Цель применения этих частиц в ветролопастях состоит как в повышении электропроводности полимерного связующего, особенно на границе угле-

родное волокно-связующее, так и в увеличении адгезии волокна к полимерной матрице за счет создания дополнительных центров сшивки полимера и нанопрофилирования поверхности углеродного волокна. Разрядные испытания панелей, где мы применили комплексную молниезащиту, включающую использование вязано-паяных сеток и углеродных наноструктурных частиц как наполнителей полимерной матрицы в поверхностных слоях композитов, и позволила получить положительный результат (рис. 5, в).

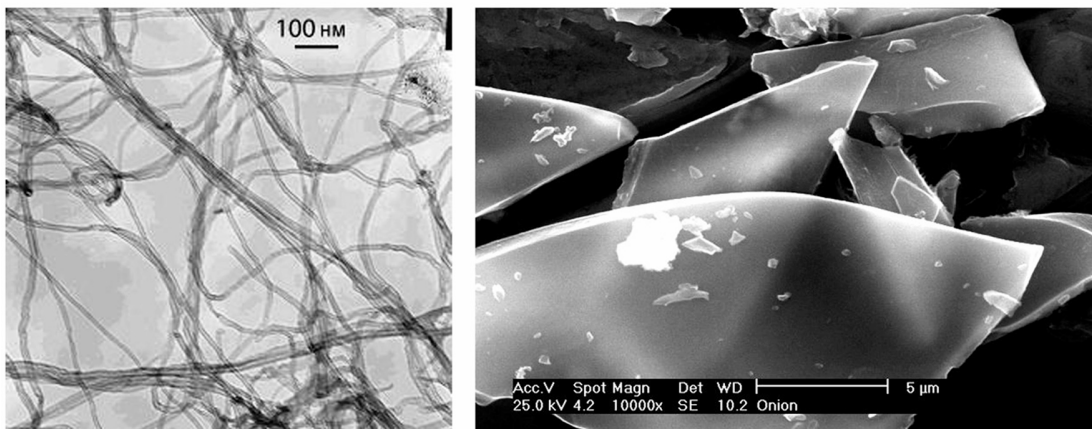
В некоторых конструкциях ветролопастей наряду со слоями из углепластиков используют стеклопластики. Стеклопластиковые ламинаты, являясь диэлектриками и будучи из конструктивных соображений расположенными ближе к внешней поверхности лопасти (как в подветренной так и в надветренной её части) создают возможность пробоя конструкции лопасти зарядом молнии (подобно пробоем конденсатора) по направлению от поверхности молниеулавливателя через диэлектрический слой к электропроводящим ламинатам из углепластиков, расположенных ближе к внутренней поверхности полулопастей. Чтобы этого не происходило, необходимо создать условия для гарантированного распространения заряда по площади поверхности лопасти (за счет увеличения её электропроводности) путем введения в поверхностные ламинаты, расположенные под молниезащитной сеткой электропроводящих добавок.

Следует отметить, что увеличение адгезионной связи на границе углеродное волокно – полимерная матрица способствует дополнительному нагружению углеродного волокна, и вместо дорогих высокопрочных волокон типа японских T700(800) для ветролопастей выгодно применять более дешевые среднечрезвычайно прочные углеродные волокна (T300).

Таким образом, можно считать справедливыми принятые технические решения, которые позволяют



Нанографиты



Углеродные нанотрубки

Графитовые нанопластины

Рис. 6. Наноструктурные частицы для модификации композитов

дать практические рекомендации по составу и конструкции ветролопастей, в которых будут использованы вязаные и вязано-паяные сетки и углеродные наноструктурные частицы.

Выводы

1. На основании опыта применения в авиационной технике разработаны медные вязаные и вязано-паяные сетки, использование которых в ветроэнергетике за счет улучшения диссипативных свойств позволяет уменьшить площадь деструкции панели и расслоения композиционного материала.

2. Предложены углеродные электропроводные наноструктурные модификаторы полимерной матрицы для повышения электропроводности в ламинатах углепластика и повышения адгезии между углеродными волокнами и связующим.

3. Предложено использовать вязано-паяные медные сетки для усовершенствования системы молниезащиты ветролопастей: молниеулавливатель и токоотвод (шинопровод).

4. Результаты работы рекомендуются для эффективной комплексной защиты ветролопастей от молнии.

Литература

- [1] Національний стандарт України. Системи турбогенераторні вітряні. Захист вітряних турбін від блискавок. ДСТУ ІЕС 61400-24-2001.
- [2] Л.Р. Вишняков, И.И. Чернявский, О.В. Зубков // Исследование возможности молниезащиты полимерных композиционных материалов, армированных медной вязаной сеткой // Вісник інженерної академії України, №2 – К., 2012 – С.143-148.
- [3] Л.Р. Вишняков, А.М. Баранников, Ю.Ф. Гринь, З.Н. Демиденко и др. // Изготовление изделий из полимерных композитов, поверхностно-армированных медными трикотажными сетками // Вісник інженерної академії України, № 3-4 – К., 2009 – С.182-186.
- [4] Л.Р. Вишняков, О.К. Недзельский, Ю.Ф. Гринь, И.И. Чернявский, Ю.М. Василенков // Разрядные испытания имитированным током молнии композиционных материалов с молниезащитой на основе медных вязаных сеток // Вісник інженерної академії України, № 3-4 – К., 2009 – С.187-191.
- [5] Вишняков Л.Р. // Разработка и внедрение вязано-паяных медных проволочных сеток для молниезащиты углепластиков в самолетостроении // Технологические системы, №1 (58). – К., 2012 – С.29-33.



Vishnyakov L.R.

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine. Ukraine, Kiev

KNITTED SOLDERED COPPER MESHES AND CARBON NANO-STRUCTURE PARTICLES FOR USE IN LIGHTNING PROTECTION OF COMPOSITE MATERIALS: EXPERIENCE IN AIRCRAFT COMPONENTS CONSTRUCTION EXPANDED TO WIND POWER PRODUCTION INDUSTRY

The experience in constructing of aircraft components was used to develop knitted soldered copper meshes that shall allow reduction of panel damages and delamination of the composite material due to improved dissipative properties. Electric conductive carbon nano-structure modifiers were suggested for the polymer matrix to increase electric conductivity in carbon plastic fiber laminates and to enhance adhesion strength between the carbon fibers and binder. Knitted soldered copper meshes were suggested for use as able to improve the wind turbine blade lightning protection system, i.e. lightning capturer and lightning current conductive bus. The results of the work shall be useful for an efficient overall protection of wind turbine blades from lightning.

Keywords: Polymer Composites, Binder, Knitted Soldered Meshes, Nano-structure particles, Lightning Protection.

References

- [1] National Standard of Ukraine. Wind turbine generator systems. Lightning protection for wind turbines. DSTU IEC 61400-24-2001.
- [2] L.R.Vishnyakov, I.I.Chernyavskiy, O.V.Zubkov // Study of the potential of lightning protection for polymer composite materials reinforced with knitted copper mesh// Bulletin of Engineering Academy of Ukraine, No.2 – K., 2012 – P.143-148. (In Russian).
- [3] L.R.Vishnyakov, A.M.Barannikov, Yu.F. Grin, Z.N. Demidenko at al. // Manufacturing of products from polymer composites surface reinforced with knitted copper meshes/ Bulletin of Engineering Academy of Ukraine, No. 3-4 – K., 2009 – P.182-186. (In Russian).
- [4] L.R.Vishnyakov, O.K.Nedzelskiy, Yu.F. Grin, I.I.Chernyavskiy, Yu.M.Vasilenkov // Lightning strike simulations of composite materials with lightning protection system based on knitted copper meshes // Bulletin of Engineering Academy of Ukraine, No. 3-4 – K., 2009 – P.187-191. (In Russian).
- [5] L.R.Vishnyakov. Development and implementation of knitted soldered meshes for lightning protection of carbon fiber plastics in aircraft structures // Technological Systems, No.1 (58). – K., 2012 – P.29-33. (In Russian).