

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В КОНСТРУКЦИЯХ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОВЫХ ТУРБИН БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

*Л.Р. Вишняков, Л.Н. Переселенцева*

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

Развитие ветроэнергетики объявлено в Украине одним из главных национальных проектов страны. В связи с этим повышенное внимание уделяется полимерным композиционным материалам (ПКМ) — стекло- и углепластикам, которые являются основными материалами для конструкций лопастей ветровых агрегатов. В последние годы развитие мировой ветроэнергетики связано с производством и эксплуатацией мощных агрегатов, в которых применяются композитные лопасти длиной до и более 80 метров. При таких размерах лопастей становится чрезвычайно желательным их изготовление на промышленных площадях, близких к месту расположения ветростанции. В порядке подготовки организационно-технических решений о производстве и эксплуатации в Украине ветровых агрегатов нами рассматривается участие в решении двух проблем. Первая из них — производство высокопрочных высокомодульных углеродных волокон (УВ) из полиакрилонитрильного (ПАН) сырья для углепластиков, используемых в конструкциях ветролопастей,

вторая — разработка и изготовление токопроводящих сетчатых материалов для защиты лопастей от ударов молнии.

После авиационной и ракетно-космической техники объемы использования высокопрочных высокомодульных УВ в ветроэнергетике являются наибольшими. По опубликованным данным мировое потребление УВ из ПАН-сырья в 2010 г. составило 5700 т, а в 2013 г. по прогнозу ожидается выпуск 11700 т УВ. Особенностью УВ применительно к ветроэнергетике является то, что для нагрузок, развиваемых в ветролопастях, можно ограничиться среднепрочными марками УВ, например, на уровне характеристик японских волокон марки T300 (табл. 1).

Планируя выпуск новых УВ, необходимо предусматривать производство и среднепрочных волокон, которые по технико-экономическим соображениям являются более подходящими для ветроэнергетики и строительства, нежели высокопрочные волокна марок T700(800), в которых в большей мере заинтересован авиакосмический комплекс Украины.

Табл. 1

Свойства некоторых углеродных волокон, выпускаемых компанией «Торей»

Тип волокна	Количество филаментов	Прочность, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Удлинение, %	Линейная плотность, текс.	Плотность, г/см <sup>3</sup>
T300	1000	3,53	230	1,5	66	1,76
	3000				198	
	6000				396	
	12000				800	
T700S	6000	4,9	230	2,1	400	1,8
	12000				800	
	24000				1650	
T800H	6000	5,49	240	1,9	223	1,81
	12000				445	

Характеристики конструкционных углепластиков на основе УВ марки Т300 и эпоксидного связующего показаны в табл. 2. Здесь же приведены свойства композитов аналогичного состава российского производства.

Анализ приведенных в табл. 1 и 2 данных показывает, что при наличии УВ собственного производства или УВ, импортированных из России и других стран, изготовление в Украине композитных ветролопастей является вполне реальным.

Следует отметить, что повысить эффективность использования среднепрочных углерод-

ных волокон в ветролопастях можно за счет наномодифицирования эпоксидного связующего углепластиков, применяемых в конструкции лопастей. Нами разрабатываются технологии получения углеродных наночастиц из отходов растительного происхождения (опилки, стружка древесины), которые в процессе пиролитической, механо-термической обработки в присутствии катализаторов, антипиренов и некоторых добавок превращаются в наноразмерные углеродные частицы кристаллического строения (рис. 1).

Табл. 2

Характеристики конструкционных углепластиков, рекомендуемых для ветроэнергетики

Характеристика	Производство России		Мировое производство	
	УОЛ-300-1А связующее ЭДТ-69Н	ЭЛУР-ПА связующее ЭДТ-69Н	Т300 связующее эпоксид 5208	Т300(12К) связующее 976
$E_{B,0^\circ}$ , ГПа	125	143	132	137,8
$E_{B,90^\circ}$ , ГПа	8,5	8,4	8,65	9,42
$\sigma_{B,0^\circ}$ , МПа	1300	900	1130	1480
$\sigma_{B,90^\circ}$ , МПа	40	22	31	40
$\sigma_{сж,0^\circ}$ , МПа	900	900	1190	1320
$\sigma_{сж,90^\circ}$ , МПа	200	180	82	211
$G_{12}$ , МПа	5600	5600	4120	6400
$\tau$ , МПа	75	70	74	78
$\mu_{12}$	0,31	0,36	0,3	0,318
Толщина монослоя, мм	0,225	0,12	0,14	0,13

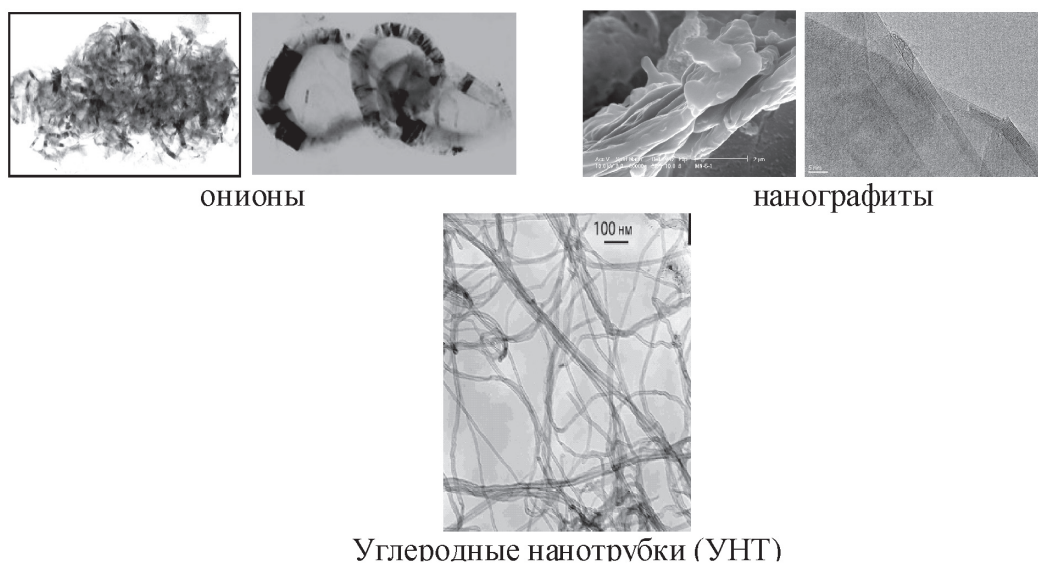


Рис. 1. Электронные изображения углеродных наночастиц

Они обладают повышенными механическими свойствами и высокой электропроводностью. Такие наномодификаторы увеличивают адгезионную прочность на границе волокно – матрица, что способствует более эффективному нагружению углеродного волокна. Известно, что надмолекулярная структура эпоксидных матриц является несовершенной вследствие неоднородности дисперсной фазы (пачки, глобулы, сетки). По этой причине, а также из-за технологических особенностей формирования композита в материале могут возникать дефекты: расслоения, повышенная пористость и зоны, которые обеднены связующим. Наномодификаторы помогают преодолеть эти дефекты и, по нашему мнению, в большей мере позволяют догрузить углеродные волокна и повысить свойства углепластиков. Так, использование наноструктурных углеродных добавок (табл. 3) повышает модуль упругости углепластиков, армированных углеродной тканью УТ900, а также стеклопластиков, армированных стеклотканью Т10.

Сравнение эффектов наномодифицирования этих композитов с разной арматурой указывает на то, что улучшение характеристик композита не зависит от природы армирующего элемента, а происходит за счет структуризации полимерной матрицы. Наши эксперименты пока не выявили четкой концентрационной зависимости модуля упругости от типа наномодификаторов, введенных в связующее. Известно, что в связи с большой поверхностной энергией углеродные частицы склонны к агломерированию. Поэтому дезинтеграция наноматериала, равномерность распределения наночастичек и его взаимодей-

ствие на границе раздела фаз в композите являются проблемными вопросами нанотехнологий, которым следует уделять пристальное внимание. Эффективным способом влияния на качество наномодифицированных композитов является ультразвуковое воздействие. Для оптимизации режимов ультразвуковой обработки необходимо определить частоту, мощность и время воздействия ультразвука, чтобы избежать механодеструкции эпоксидной матрицы. Для исследований этих объектов необходимо привлекать точные термоаналитические методы, результаты которых позволяют разработать технологические процессы получения наномодифицированных эпоксиглепластиков.

Как известно, углепластики электропроводны, однако слои углеродных волокон, объединенные, например, эпоксидным связующим, имеют проводимость на три порядка ниже, чем алюминий. Поэтому резистивный нагрев углепластика, подвергнутого удару молнии, является очень сильным и сопровождается деструкцией композита, поскольку полимерная матрица начинает испаряться уже при 200 °С. Давление газов может повлечь расслоение и привести к разрушению конструкции лопасти. К тому же углепластик может даже загореться в точке привязки молнии.

Важной проблемой защиты лопастей от молнии является безопасное проведение тока от места попадания молнии до заземления таким образом, чтобы предотвратить формирование дуги в середине лопасти. Этого можно достичь отведением тока молнии от места ее попадания через поверхность к хвостовику лопасти, используя сетчатые молниеулавливатели и молниеотводы (рис. 2).

Табл. 3

Некоторые свойства образцов композитов на основе эпоксидной смолы ЭД-20, армированной угле- и стеклотканью

Состав композиции		Свойства		
Армирующие элементы, %	Наноструктурные добавки, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Модуль упругости, ГПа	Прочность при изгибе, МПа
УТ-900, 62	–			
УТ-900, 69	Онионы, 1,5	1,39	88	290
УТ-900, 56	Онионы, 4	1,49	112	360
УТ-900, 51	Онионы, 6,5	1,5	120	380
УТ-900, 64	УНТ, 1,2	1,46	127	490
УТ-900, 64	УНТ, 3,7	1,44	145	640
Склоткань Т-10, 64	–	1,77	39,4	850
Склоткань Т-10, 62	Онионы, 4	1,76	49	896
Склоткань Т-10, 62	УНТ, 2	1,76	51	950
Склоткань Т-10, 61	УНТ, 1,2	1,74	45	930

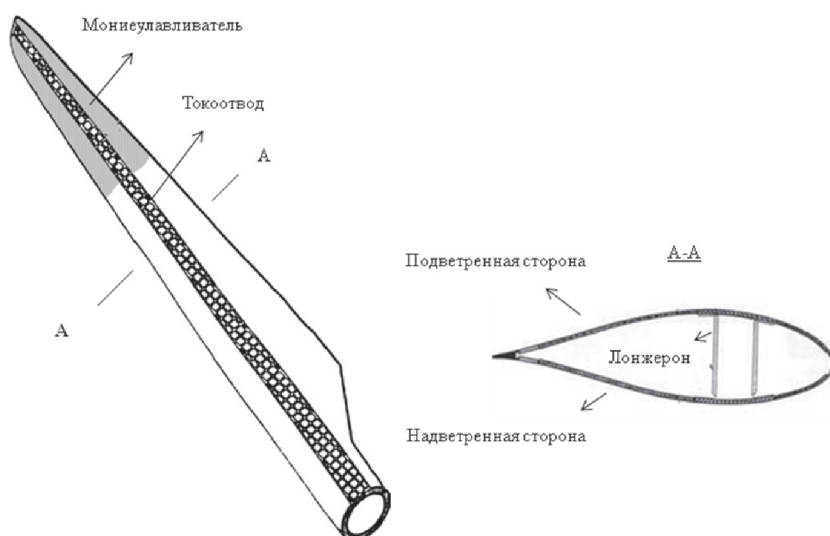


Рис. 2. Расположение молниеулавливателя и токоотвода на ветролопасти

Нами было установлено, что в качестве молниеулавливателей целесообразно использовать вязано-паяные сетчатые полотна трикотажной структуры. От молниезащитных сеток, применяемых в самолетостроении, они отличаются тем, что изготавливаются переплетением сетчатого жгута, состоящего из двух или трех медных проволок. Сетки пропаиваются легкоплавким оловянно-свинцовым припоем ПОС-61, а их структура обладает диссипативными свойствами при трансформации и поглощении энергии молнии. Этому способствуют механизмы распайки петель и испарения припоя с проволок при воздействии джоулева тепла, сопровождающего удар молнии. Кроме того, механизмами, снижающими разрушающие действия молнии, являются распрямление проволок в петлях трикотажных ячеек и их вытягивание из полимерного связующего. Сетчатый молниеулавливатель необхо-

димо располагать на той части поверхности лопасти, которая по статистике в наибольшей мере подвержена попаданию молнии. Что касается молниеотвода, то его рекомендуется изготавливать в виде пористой шины из пакета, состоящего из таких же медных трикотажных сеток. Структура и состав сеток для молниеотвода совпадают с материалом молниеулавливателя, однако сечение молниеотвода должно быть увеличено для пропускания больших токов. Этого и достигают путем увеличения количества слоев сетки в молниеотводящей ленте (шине).

Электрическое сопротивление молниезащитных сеток, используемых для молниеулавливателей и молниезащитных шин, зависит от материала и диаметра проволок, присутствия легкоплавкого покрытия на поверхности проволок и в местах их контакта в пучке и петлях (табл. 4). С целью снижения веса молниезащитных вязано-паяных сеток нами рекомендовано применять жгут из двух или трех медных луженых проволок диаметром 0,08 мм.

Зависимость удельного электросопротивления сетчатых полотен от поверхностной плотности (рис. 3) показывает, что путем подбора состава медных проволочных жгутов можно снизить вес сеток при сохранении заданной проводимости токоотводящих полотен. Таким образом, подбирая состав и структуру вязаных и вязано-паяных сеток, можно повысить молниезащищенность лопастей путем организации эффективного токоотвода и диссипации энергии молнии.

Табл. 4

Электрическое сопротивление образцов вязано-паяных сеток

Материал проволоки сетки	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Толщина полотна, мм	Удельное поверхностное электросопротивление полотна, ρ, мОм
Латунь (1 нить) Ø0,1 мм	112,0	0,39	637,5
Медь (1 нить) Ø0,1 мм	142,0	0,38	9,9
Медь (1 нить) Ø0,12 мм луженная припоем ПОС-61	143,0	0,42	6,7
Медь (2 нити) Ø0,12 мм луженная припоем ПОС-61	327,0	0,53	3,3
Медь (3 нити) Ø0,12 мм луженная припоем ПОС-61	457,0	0,64	2,33

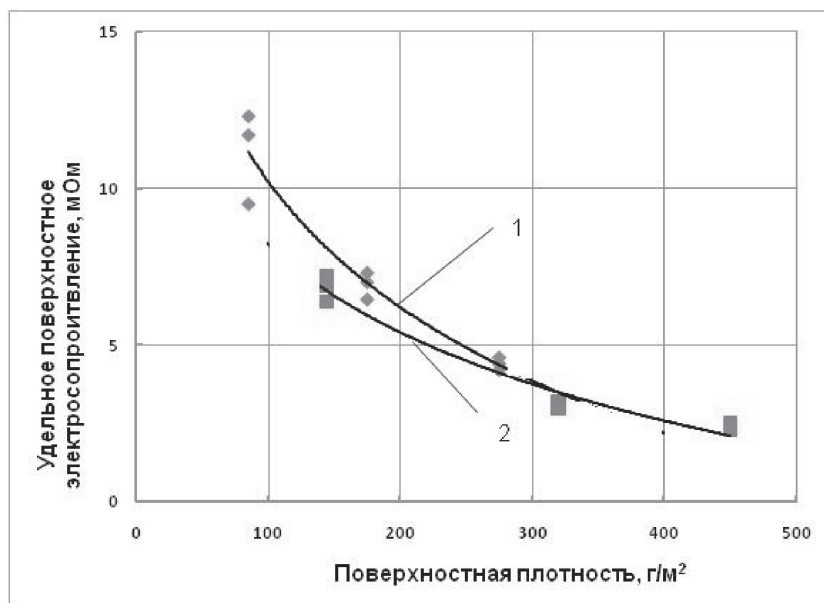


Рис. 3. Зависимость удельного поверхностного электросопротивления сеток от поверхностной плотности:

1 — сетки из проволоки диаметром 0,08 мм (1, 2, 3 проволоки в пучке);  
2 — диаметром 0,12 мм (1, 2, 3 проволоки в пучке)

Нашими экспериментами было также установлено, что наряду с молниезащитными сетками положительное влияние на распределение электрических зарядов по поверхности лопасти оказывают углеродные наномодификаторы, которые снижают электросопротивление эпоксидного связующего примерно на 3 порядка. Было

**Вывод.** Прогресс в области ветроэнергетики тесно связан с разработкой, производством и применением конструкционных и молниезащитных композиционных материалов, в которых важную роль играют армирующие наполнители — углеродные волокна, токоотводящие проволочные сетки и электропроводящие частицы.

установлено, что если расположить электропроводящий слой непосредственно под сетчатым молниеуловителем с заменой, например, слоя стеклопластика на углепластик либо применением стеклопластика, наполненного углеродными частицами, можно избежать опасной локализации заряда в точке попадания молнии. Это предотвратит возможный пробой материала с поверхности на расположенные внутри конструкционного набора лопасти углепластиковые проводящие слои, подобно пробую обкладок конденсатора.

Выпуск вязано-паяных токоотводящих сеток для ветроэнергетики и авиации осуществляет производственный участок Научно-технического центра «Композиционные материалы» при ИПМ НАН Украины, г. Киев.

## РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ В ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ

*В.А. Томило*

*Физико-технический институт НАН Беларуси*

*г. Минск, Беларусь*

Основной тенденцией в промышленности экономически развитых стран, особенно в заготовительном и основном производстве изделий машиностроения, является максимальное использование методов обработки металлов давлением

(ОМД), позволяющих существенно снижать металлоемкость изделий, повышать механические свойства материалов, обеспечивать высокую производительность и снижение себестоимости деталей. Пластическая деформация, обеспечивая