

## РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ВЯЗАНО-ПАЯНЫХ МЕДНЫХ ПРОВОЛОЧНЫХ СЕТОК ДЛЯ МОЛНИЕЗАЩИТЫ УГЛЕПЛАСТИКОВ В САМОЛЁТОСТРОЕНИИ

### Анотація

Розроблено та впроваджено систему блискавозахисту авіаційних конструкцій із вуглепластиків, в якій застосовані мідні дротяні сітки трикотажної структури та електропровідні вуглецеві наноструктурні модифікатори полімерного зв'язуючого. Переваги цієї системи полягають в досягненні підвищених теплопровідності та дисипативної здатності, що знижує руйнівну дію блискавки на композит. В'язано-паяні сітки еластичні і не ускладнюють технологію формування деталей із вуглепластиків. При виготовленні таких сіток використовують покриття мідних мікродротів легкоплавкими припоями. Організовано виробництво та постачання блискавозахисних в'язано-паяних мідних дровових сіток користувачам — підприємствам авіаційної галузі Російської Федерації та України.

Для модифікації епоксидного зв'язуючого у вуглепластиках запропоновано використовувати вуглецеві наноструктурні наповнювачі оніоподібної та пластинкуватої форми, які одержують із дерев'яної стружки. Вони призначені для підвищення провідності композиту в напрямку поперек орієнтації вуглецевих волокон, що покращує рівномірність тепло- та струмовідводу у разі удару блискавки.

### Abstract

A lightning protection system is developed for carbon fiber plastics aircraft structure protection that includes copper wire meshes of knitted structure and electric conductive carbon nano-structure modifiers of polymer binder. The advantages of this system consist in achieving an increased heat conductivity and dissipative capability that reduce the destroying lightning strike effect upon the composite. The knitted soldered meshes are flexible and do not complicate the process while formation of carbon plastics components. To manufacture such meshes, copper micro-wires with low melting solder coatings have been developed. The knitted soldered copper wire meshes are being manufactured and delivered to customers, i.e. aircraft producers of Russian Federation and Ukraine. As modifiers for the epoxy binder, carbon nano-structure fillers of onion-like and platelet-like shapes were sug-

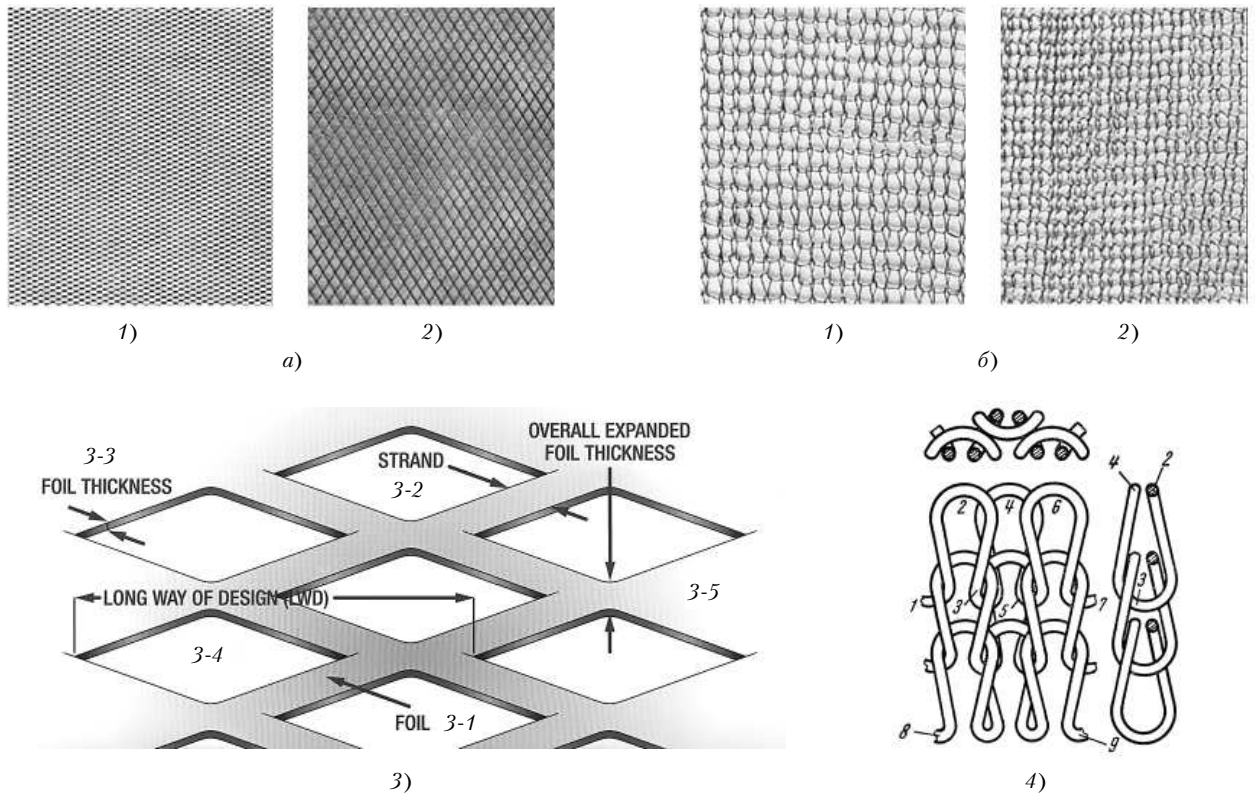
gested, which are produced from wood chips. They are designed for increasing conductivity of the composite transversely to the carbon fiber direction thus improving the uniformity of the composite heat- and current sink from the lightning strike detachment.

### Цель работы

Целью работы является разработка средств защиты от ударов молнии полимерных композиционных материалов (ПКМ), используемых в современных самолётах. Главное внимание уделяется созданию альтернативных растяжным медным фольгам — проволочных сеток трикотажной структуры, которые обладают повышенной диссипативной способностью, эластичностью, прочностью и высокой технологичностью. Эти преимущества можно реализовать, используя петельное строение токоотводящих полотен, изготовленных из медных микропроволок, которые покрываются легкоплавким припоем и подвергаются соединению пайкой проволочных петель сетки. Как дополнительное средство повышения токоотвода в поверхностных слоях (ламинатах) углепластика необходимо опробовать углеродные наноструктурные частицы оніоподібної и пластинчатої форми, которые вводятся в полимерный композит.

### Основная часть

В современных гражданских самолётах (Boeing, Airbus) как средство молниезащиты чаще всего применяют медную и просечную фольгу типа Strikegrid, Astrastrike, Dexmet. Эти фольги, получаемые с использованием операций просечки, штамповки и растяжки имеют характерную ромбическую ячейку определённых размеров с перемычками в виде прямоугольного поперечного сечения (рис. 1, а). В отличие от просечных фольг проволочные сетки образованы петлями, нанизанными друг на друга (рис. 1, б). В зависимости от выбранной структуры вязаная сетка может изготавливаться «кулирными» переплетениями, из которых наибольшее распространение получило переплетение типа «ластик 1+1», образующее полотно из лицевых и изнаночных петель. Это двустороннее переплетение обладает устойчивостью формы, однако характерная для металлотрикотажа подвижность петельных ячеек не позволяет образовывать стабильные электрические контакты между



**Рис. 1.** Структура металлических молниезащитных растяжных фольг и вязаных проволочных сеток:

- а) растяжные фольги: 1 – Strikegrid SG-2; 2 – AstraStrike Cu 029;  
 3 – структура растяжной фольги: 3-1 – фольга; 3-2 – ширина перемычки; 3-3 – толщина фольги;  
 3-4 – шаг поперечный между ромбическими ячейками; 3-5 – ширина перемычки смежных ромбических ячеек;  
 б) вязаные проволочные сетки: 1 – сетка из медной проволоки диаметром 0,12 мм; 2 – сетка из медной проволоки диаметром 0,08 мм;  
 4 – структура вязаной сетки «ластик 1+1»: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 – структурные элементы проволочных петель

проволоками, что снижает электропроводность молниезащитного полотна. Способом повышения электропроводности металлтрикотажных сеток является пайка электрических контактов между проволочными петлями. Такие контакты не позволяют затекать связующему в межпроволочное пространство при наформовке сетки на поверхность ПКМ. Весовые показатели таких сеток, которые весьма важны для авиационных конструкций, можно ограничить за счёт применения особо тонких медных проволок, рационального подбора размеров проволочной петли и оптимизации поверхностной плотностной сетчатого полотна.

Кабельной промышленностью Украины выпускаются медные проволоки малых диаметров (от 0,07 до 0,12 мм), однако для изготовления металлтрикотажных полотен они не пригодны из-за низкой прочности либо низкой пластичности. Характерные свойства медных проволок (табл. 1) свидетельствуют о том, что у стандартных проволок по ГОСТ 2112-79 высокая прочность сочетается с низкой пластичностью и наоборот: высокая пластичность сочетается с недостаточной прочностью. Нанесение на микропроволочку легкоплавкого припоя в виде жидкого расплава может оказывать на неё разупрочняющее

Таблица 1  
**Свойства медных проволок по ГОСТ 2112-79**

Ø, мм	тип ММ		тип МТ	
	σ, МПа	δ, %	σ, МПа	δ, %
0,08	200–290	14	420–430	–
0,01	200–280	16	420–430	0,6
0,12	200–280	18	400–430	0,6

действие. В процессе вязания микропроволочки подвергаются перегибам, сопровождаемым деформациями растяжения и изгиба, а также образованием пыли при трении проволок о рабочие поверхности деталей вязальной машины. Кроме того, возникают дефекты, связанные с разрывами проволок, затяжкой петель в узлы, иногда их хрупкостью и ломкостью. Нашими экспериментами было установлено, что для изготовления вязаных сеток медная микропроволочка должна обладать прочностью ~300 МПа и пластичностью ~12–18 %. Для получения микропроволочки с такими характеристиками должны быть использованы определённые марки медного проката с низким содержанием кислорода (табл. 2). Металлургический передел для оптимизации свойств мед-

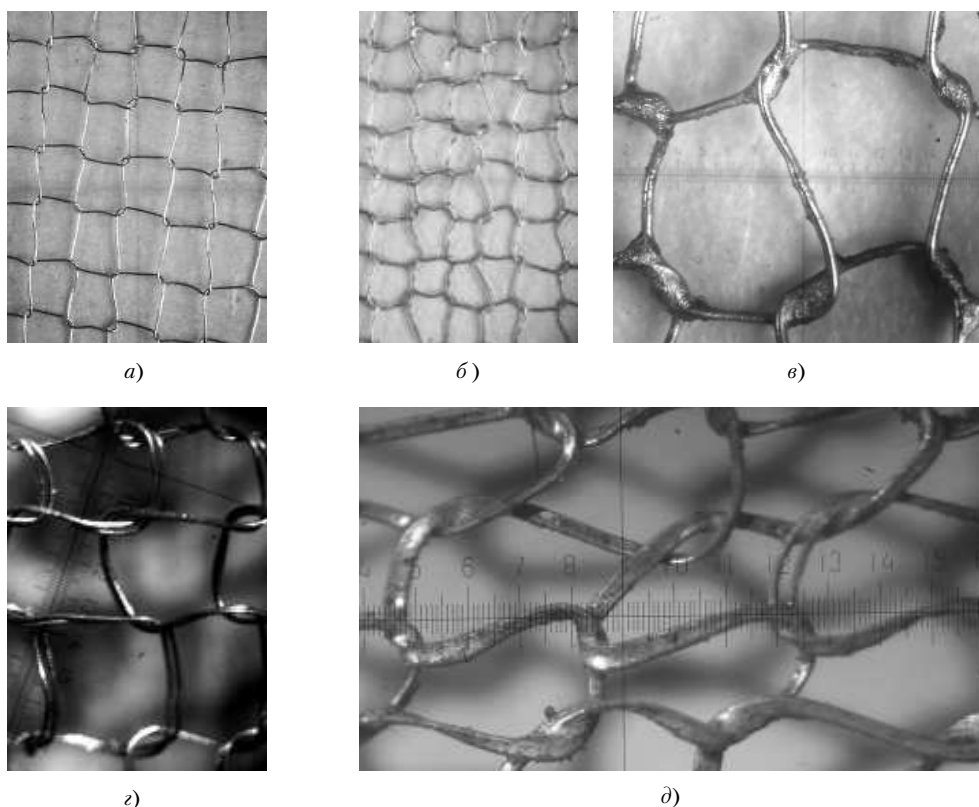


Рис. 2. Структура вязаной и вязано-паяной сетки:

а) вязанная сетка – 1 нить; б, в) вязано-паяная сетка – 1 нить; з) вязанная сетка – 2 нити; д) вязано-паяная сетка – 2 нити

ных микропроволок следующий: волочение в алмазных фильерах (от  $\varnothing 8$  до  $0,07$  мм) и совмещение в одной установке как волочения, так и лужения припоем ПОС-61. Особенности лужения микропроволок также являются: промежуточные отжиги при переходах на более низкий диаметр и калибровка в алмазных фильерах. По отработанной нами технологии были получены медные микропроволоки (табл. 3) и налажен устойчивый производственный выпуск вязано-паяных сеток. Так, в Научно-техническом центре «Композиционные материалы» Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины создан производственный участок молние-защитных вязаных сеток, которые поставляются по заявкам потребителей на авиационные предприятия России и Украины. Фотографии различных вариантов вязаных и вязано-паяных медных сеток (рис. 2).

Следует отметить, что выбор легкоплавкого припоя для лужения медных микропроволок представляет одну из важных самостоятельных задач, от правильного решения которой зависят эксплуатационные характеристики молние-защитных вязано-паяных сеток. В настоящее время потребители этой продукции используют сетки, изготовленные из одной проволоки, покрытой оловянно-свинцовым припоем ПОС-61. Поскольку согласно Международным нормам, применение свинца в технике ограничено, в работе была предпринята попытка заменить припой

Таблица 2

Медный прокат для волочения микропроволок

Содержание кислорода в медном прокате	Свойства	
	$\sigma$ , МПа	$\delta$ , %
$O_2$ , ‰		
7,0	214	45,0
8,5–9,0	217	43,0
10,0	216	42,5

Таблица 3

Свойства разработанных микропроволок

$\varnothing$ , мм	Без покрытия		С покрытием припоем ПОС-61	
	$\sigma$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma$ , МПа	$\delta$ , %
0,075	334	8,1	–	–
0,08	328	8,4	308	14,6
0,095	301	9,9	290	14,9
0,10	302	9,7	280	15,8
0,115	304	9,8	285	15,7
0,120	290	10,2	282	18,0

Механические свойства и электросопротивление медных сеток

№ п.п.	Тип сетки	Поверхностная плотность сетки, г/м <sup>2</sup>	Толщина сетки, мм	Прочность, Н (полоска шириной 50 мм)		Относительное удлинение, ε, % (при разрушении)		Удельное поверхностное электрическое сопротивление, мОм	
				вдоль полотна	поперек полотна	вдоль полотна	поперек полотна	вдоль полотна	поперек полотна
1	Вязано-паяная сетка из проволоки Ø 0,08 мм ТУ У 28.7-24377962-009-2011	85±5	0,36±0,02	22,0	15,0	33,0	72,0	4,65±0,2	7,25±0,45
2	Astrostrike (эксперимент)	140,0	0,2	38,0	17,0	42,0	95,0	3,95	2,15

ПОС-61 на опытный бессвинцовый легкоплавкий припой системы Sn – 8% Bi. При этом важно было определить характер смачиваемости этим припоем медной проволоки в зависимости от температуры (рис. 3). В табл. 4 приведены главные свойства молниезащитной вязано-паяной сетки, которая нашла применение в элементах конструкций самолётов АН-148, АН-158 и других. Для сравнения в этой же таблице приведены свойства сетки Astrastrike Cu 029, имеющей поверхностную плотность 140,0 г/м<sup>2</sup>.

Проверка защитных свойств вязано-паяной токоотводящей сетки производилась при разрядных испытаниях, которые имитируют воздействие удара молнии в композитную панель стандартного размера 500×500 мм. Особое внимание было уделено слоистому строению конструкции разрядных панелей. При этом предполагалось, что, не затрагивая в целом конструкционный набор панели, можно изменять проводимость лишь 1-3<sup>x</sup> поверхностных слоёв (ламинатов), вводя молниезащитную проволочную сетку на поверхность панели (с покрытием выравнивающими и лакокрасочными слоями). Для ламинатов из углепластика под сеткой было применено эпоксидное связующее на основе смолы ЭДТ-69Н, в которое предварительно вводили углеродные наноструктурные частицы (до 3 мас.% по отношению к количеству связующего). Эти частицы разработаны в Институте проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН

Украины. Сырьём для наноструктурных углеродных частиц служили отходы растительного производства, например, стружка сосны. Она подвергается специальной химико-термической обработке и наследует структуру органического предшественника. Получаемые продукты представляют собой электропроводные наноразмерные частицы кристаллического строения онионоподобной или пластинчатой формы.

Разрядные испытания опытных панелей с системой молниезащиты из вязано-паяных токоотводящих сеток и углеродных наноструктурных модификаторов, вводимых в поверхностные ламинаты эпоксид-углепластика проводили на электрофизическом сертифицированном разрядном стенде в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», г. Харьков, по самому жёсткому режиму, характерному для зоны самолёта 1А (рис. 4). Этот режим является определяющим при проверке молниестойкости ответственных узлов самолёта, например, топливных баков. При этом не допускается сквозной прожиг композита или высокая температура его нагрева, способная воспламенить пары топлива. В табл. 5 представлены результаты сравнительных стендовых испытаний панелей с молниезащитной сеткой Astrastrike Cu 029 и вязано-паяной сеткой по ТУ У 28.7-24377962-009-2011 «Молниеотвод эластичный улучшенный для полимерных композитов». В качестве наномодификатора связующего в 2-х поверхностных ламинатах использовались

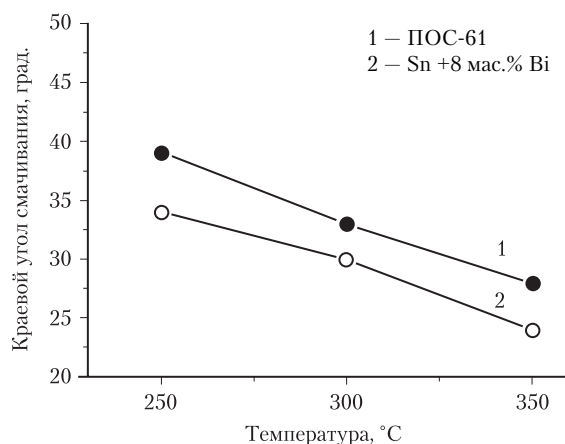


Рис. 3. Смачиваемость меди припоями

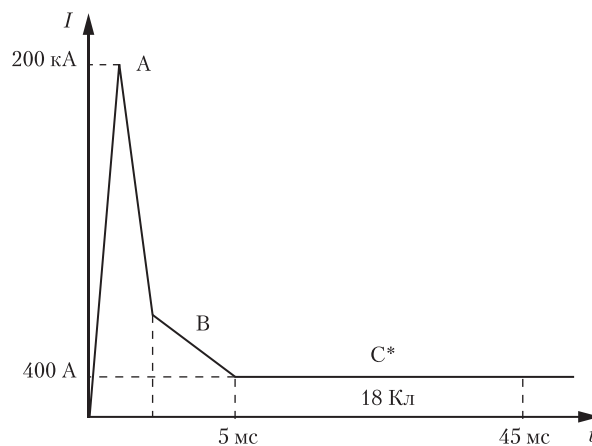


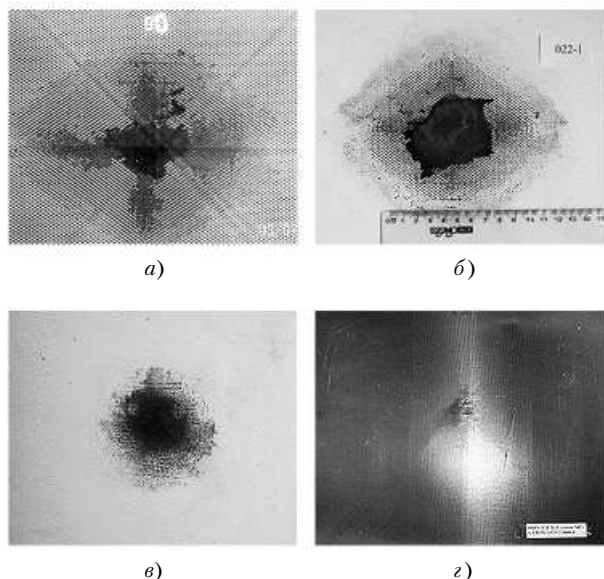
Рис. 4. Испытательный импульс тока для зоны 1А

Таблица 5

**Результаты стендовых испытаний имитированной молнией (по условиям зоны 1А)  
композитных панелей с молниезащитой**

Характеристика панелей композитов с молниезащитой	Омическое сопротивление образца до испытаний, мОм	Масса, г			Исходная толщина панелей, мм	Глубина кратера после разряда, мм
		до испытаний	после испытаний	потеря массы		
Astrostrike Cu 029	4,0	246,75	244,62	2,13	1,10	0,50
Вязано-паяная сетка из проволоки $\varnothing 0,08$ мм ТУ У 28.7-24377962-009-2011	6,6	261,22	258,66	2,56	1,23	0,38

углеродные частицы по ТУ У 24.1-05416932-004-2009 «Вуглець оніоноподібній УНО». На рис. 5 представлены фотографии фронтальной (а) и тыльной (б) стороны панелей с разными типами молниезащиты. Как видно из табл. 5, сквозное повреждение панели отсутствует, а глубина кратера при повреждении панели с использованием вязано-паяной сетки и наномодифицированного связующего меньше, чем при молниезащите панели с фольгой Astrastrike.

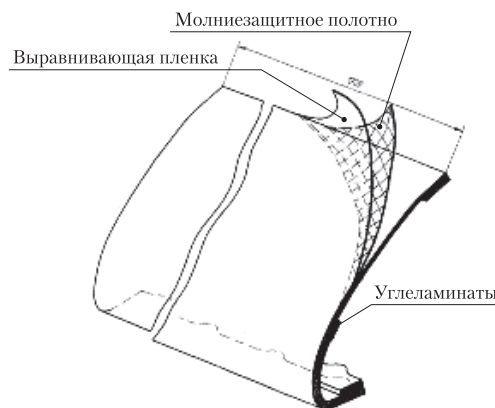


**Рис. 5.** Повреждение панелей с фольгой Astrostrike Cu 029 и вязано-паяной сеткой из проволоки  $\varnothing 0,08$  мм:

а, в – фронтальная сторона; б, з – тыльная сторона;  
а, б – молниезащита фольгой Astrostrike Cu 029;  
в, з – молниезащита вязано-паяной сеткой из проволоки  $\varnothing 0,08$  мм и углеродными наноструктурными модификаторами

В результате проведенных исследований можно сделать заключение о преимуществах применения в системах молниезащиты эпоксигуглепластиков вязано-паяных сеток. Так, цилиндрическая форма проволоки более равномерно распределяет электрические заряды по сравнению с прямоугольными сечениями структурных элементов растяжной фольги типа Astrastrike; при испарении легкоплавкого припоя снижается тепловое воздействие молнии на композит; вязано-паяная структура сетки способствует релаксации механической нагрузки путём

выпрямления проволочных петель и вытягивания их из связующего, на что затрачивается часть энергии. Эти факторы в отличие от сетки типа Astrastrike предотвращают или снижают степень разрушения и расслоения композита. Использование эластичных вязано-паяных сеток не усложняет процесс формовки и автоклавного прессования деталей самолёта сложной криволинейной формы (рис. 6).



**Рис. 6.** Схема сборки детали обшивки из углепластика с молниезащитной сеткой

### Выводы

1. Разработана система защиты от ударов молнии элементов конструкций самолётов из углепластиков при использовании в поверхностных слоях композитов вязано-паяной медной сетки и углеродных частиц.
2. По сравнению с медными растяжными фольгами вязано-паяные проволочные сетки обладают повышенной диссипативной способностью, реализующейся при испарении легкоплавкого припоя с поверхности проволоки, выпрямлении и вытягивании микропроволок из полимерного связующего. Указанные механизмы снижают степень разрушения композита при воздействии молнии.
3. Организованы производственные участки изготовления медной лужённой микропроволоки и вязано-паяных молниезащитных сеток. Продукция поставляется по заявкам промышленных предприятий Российской Федерации и Украины.