



Ткаченко А.Н.<sup>1</sup>, Вишняков Л.Р.<sup>2</sup>, Гогаев К.А.<sup>2</sup>, Нешпор А.В.<sup>2</sup>, Коханая И.Н.<sup>2</sup>, Коханый В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО "КАТЭХ-ЭЛЕКТРО". Украина, Киев.

<sup>2</sup> Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины. Украина, Киев

## МЕДНЫЕ МИКРОПРОВОЛОКИ ДЛЯ МОЛНИЕЗАЩИТНЫХ СЕТОК ТРИКОТАЖНОЙ СТРУКТУРЫ

### Анотація

*Надано рішення науково-технічної задачі по виготовленню і організації промислового випуску луженого мідного мікродроту діаметром 0,07–0,12 мм, з якого виготовляються сітки для використання в системі блискавкозахисту конструкційних композиційних матеріалів з полімерною матрицею. Оптимізовані умови процесів волочіння і покриття мідного дроту олов'яно-свинцевими припоями для досягнення як підвищених міцності і пластичності, так і здатності до переробки у блискавкозахисні сітки в'язаної і в'язано-паяної структури.*

### Abstract

*Solution of a task has been presented relative to the commercial production of tinned copper microwire of 0.07–0.12 mm in diameter useful to be processed in meshes for lightning protection systems to protect structural composite materials with polymer matrix. Conditions of the processes of drawing and coating of the copper wire with tin-lead solders have been optimized to achieve both improved strength and plasticity and capability to be processed into lightning protection meshes of knitted and knitted soldered structure.*

### Введение

Проблема молниезащиты летательных аппаратов и лопастей ветроэнергетических установок в последние годы становится очень актуальной в связи с широким применением высокопрочных полимерных композиционных материалов (ПКМ), отличающихся низкой электро- и теплопроводностью. Сегодня для этих объектов техники разрабатываются различные способы защиты от влияния молнии, которые, главным образом, состоят в образовании на поверхностях ПКМ токоотводящего металлического слоя в виде сплошной и перфорированной фольги или нанесения металлизированных покрытий.

Одним из перспективных способов создания металлизированных слоёв является наформовка на поверхность деталей из ПКМ вязаных сеток, петельная структура которых образована медными микропроводами диаметром 0,07–0,12 мм. Такие сетки должны сочетать большую растяжи-

мость с низким электросопротивлением, высокой теплопроводностью и достаточной технологической прочностью. Поскольку для авиационной техники очень важным является снижение весовых характеристик, разработку молниезащитных сеток необходимо проводить, применяя проволоки малых диаметров (микропровода), стремясь при достижении достаточной электропроводности систем молниезащиты элементов обеспечить в конструкциях из ПКМ минимальный привес.

### Состояние вопроса

В результате проведенных в конце 1980-х гг. в ИПМ НАН Украины научно-технических работ в качестве токоотводящих молниезащитных сеток для защиты панелей из ПКМ были предложены и внедрены авиационную технику вязаные сетки СВ-2 ТУ 383-33-88, изготовленные из медных проволок, покрытых оловянно-свинцовыми припоями. В течение последних 10-ти лет были разработаны сетки с особой вязано-паяной структурой [1–3]. В этих сетках нивелирована характерная особенность, присущая структуре всех вязаных металлических сеток, а именно — анизотропия электропроводности вдоль и поперек сетчатого полотна (из-за непостоянства механических и электрических контактов между проволоками смежных рядов). Этого эффекта удалось достичь путём осуществления операции пропайки петель смежных проволочных рядов сетки.

Как показала практика, производство микропроводов для молниезащитных сеток оказалась весьма сложной технической задачей, поэтому главной целью совместных работ ИПМ НАН Украины и ООО "КАТЕХ-ЭЛЕКТРО" явилась разработка стабильной производственной технологии получения медных микропроводов, покрытых легкоплавкими припоями. На практике такая технология должна была обеспечить решение комплексных вопросов, связанных как с волочением тонкой медной проволоки, так и с организацией процесса лужения микропроводов, обладающей определёнными прочностными и электрическими характеристиками. Луженные микропровода, полученные по разрабатываемой технологии, должны обладать такими характеристиками, которые смогли бы обеспечить изготовление из них качественных вязаных и вязано-

паяных сеток, пригодных для применения в молниезащитных покрытиях ПКМ [3, 4].

### Цель и задачи работы

При решении научно-производственных задач получения лужёных микропроволок в первую очередь необходимо было выбрать тип заготовки для волочения проволок. Не менее важным является выбор технологического оборудования и рациональных режимов лужения проволоки оловянно-свинцовым припоем. При этом особое внимание должно быть уделено степени нагартовки, которую приобретает микропроволока при волочении, качеству поверхности (шероховатости) и тонкой структуре поверхностных слоев. Эти характеристики, а также толщина слоя и равномерность покрытия микропроволоки определяются конкретными режимами и условиями проведения отдельных операций технологического процесса, включающими очистку поверхности микропроволоки от механических загрязнений и оксидов, обработку флюсами, оптимизацией температурного и скоростного режимов нанесения покрытий.

### Выбор заготовки и способа волочения микропроволоки

В кабельной промышленности Украины для волочения медных проволок малых диаметров в настоящее время чаще всего используют медный прокат производства Украины, России, Германии, Венгрии и Польши.

В зависимости от поставщика медный прокат отличается по химическому составу и свойствам. Нами были проведены технологические испытания продукции нескольких поставщиков медной катанки. Стабильные характеристики показал прокат Чепельского металлургического комбината (Венгрия). Следует отметить, что содержание кислорода в исходной заготовке оказывает существенное влияние на свойства микропроволок. В таблице 1 приведены химический состав и характеристики проката, который был опробован для волочения медных микропроволок.

Пониженное содержание кислорода в этом прокате связано с использованием технологии DF (Deer Forming), осуществляемой в защитной

атмосфере. Обычно в такой катанке содержится от 5 до 20 0/00 кислорода, однако для наших целей потребовался прокат с более низким содержанием кислорода — 5÷10 0/00, в котором обеспечивается более высокая пластичность при сохранении достаточно высокой прочности. На таком же уровне находятся механические свойства медного проката компаний "Nord Deutschland Afineri", Германия, и KGHM, Польша, при содержании кислорода — 5÷10 0/00. Эти виды проката по результатам наших экспериментов также оказались пригодными для получения медных лужёных микропроволок с такими свойствами, которые позволяли осуществлять процесс дальнейшего вязания сеток.

Волочение проходило с использованием волочильных машин фирмы SAMP, Италия. Отметим, что грубое волочение осуществлялось до диаметра 1,35 мм при отжиге, обеспечивающем относительное удлинение 40–42%. Среднее волочение осуществлялось на тех же машинах SAMP до диаметра 0,16 мм (относительное удлинение проволоки 0,16 мм 38–40%).

Начиная с диаметра проволок 0,16 мм, волочение, а также последующее лужение микропроволоки проводили на горизонтальной машине производства итальянской фирмы Italia Impianti, которая предназначена для получения электротехнических проводов с лаковым покрытием. В нашем случае был использован тип машины НО 0/2, на которой получают провода диаметром 0,05–0,14 мм. Эта машина была частично переоборудована и доукомплектована так, что её волочильный узел позволил осуществить 20 переходов с использованием алмазных фильер и эмульсионной смазки. Применяли также операции промежуточной мойки проволоки водяным паром и технологические отжиги, что позволяло получать микропроволоки высокого качества.

Например, изготовленная микропроволока диаметром 0,07 мм имеет достаточно высокие предел прочности — 350–380 МПа и относительное удлинение, которое составляло 12–17%. На этой проволоке была достигнута способность, не разрушаясь, перегибаться при формировании петель, несмотря на высокий уровень нагартовки.

На следующем этапе разработки было проведено экспериментальное опробование полученных

Таблица 1

Состав и характеристики медного проката для волочения микропроволоки

№ партии	Вид проката		Состав		Механические свойства	
	Диаметр, мм	Стандарт	Медь, %	Кислород, 0/00	$\sigma$ , МПа	$\delta$ , %
1	8	DIN1787	99,97	7,0	212–216	43,5–47,0
2	8	DIN1787	99,97	8,5÷9,0	215–219	42,0–43,5
3	8	DIN1787	99,97	10,0	215–216	39,5–46,0

микропроволок для изготовления вязаных сеток. Работы проводились в ИПМ НАН Украины на специализированных вязальных станках, в основу которых были положены переоборудованные промышленные вязальные полуавтоматы типа МПФ-4 (завод "Легмаш", г. Черновцы, Украина). На рис. 1 показана одна из вязальных установок, а на рис. 2 — различные типы образцов сеток, изготовленные из медных микропроволок, в том числе вязано-паяная сетка, полученная пропайкой петель в готовом сетчатом полотне.

Как показала практика, для медных трикотажных сеток лучшими структурными характеристиками обладают кулирные переплетения типа "ластик". Оно имеет строение двухлицевого полотна (с лицевыми и изнаночными петлями) и изготавливается по простой и производительной технологии.

Наиболее ответственными операциями процесса вязания медных трикотажных сеток является прокладывание проволоки на заданной длине



Рис. 1. Вязальный полуавтомат

формообразующего узла вязального оборудования (игольницы) и формирование проволочных петель в пазах игольницы путем изгиба и вытягивания проволоки с помощью вязальных игл. При вязании следующие ряды изогнутой в виде петель проволоки нанизываются на петли предыдущих рядов, образуя вязаное полотно.

Процесс петлеобразования, который характеризует технологию изготовления медного трикотажа, требует повышенного внимания к характеристикам медных микропроволок, и, в частности, их технологичности. Так, проволока не должна разрезаться на острых краях игольницы при вытягивании её вязальными иглами в игольные пазы. На поверхности петель не должно образовываться медной пыли от трения о кромки и стенки игольных пазов (поэтому игольницу обычно смазывают маслом). Кроме того, на микропроволоке при подаче её в игольницу не должно быть так называемых "сукрутин", вследствие неравномерного схода проволоки с катушек и образования дефектов при перегибах.

#### Лужение микропроволоки

Остановимся более подробно на операции лужения медных микропроволок. Эту операцию чаще всего проводят с использованием легкоплавких оловянно-свинцовых припоев (табл. 2).

Из приведенных в таблице 2 припоев по наименьшей плотности, температурным условиям отверждения эпоксидного связующего композита и технологичности нами был выбран припой ПОС 61.

На рис. 3 показана общая схема лужения методом протягивания проволоки через ванну с расплавом оловянно-свинцового припоя, которая при реализации на современном оборудовании отличается лишь конкретным исполнением.

Как известно, для осуществления качественного лужения, медная проволока должна быть тщательно очищена от загрязнений. Согласно общепринятой схеме (рис. 3), с разматывающегося устройства 1 микропроволока, проходит через травильную ванну 2 и протирки 3, после чего

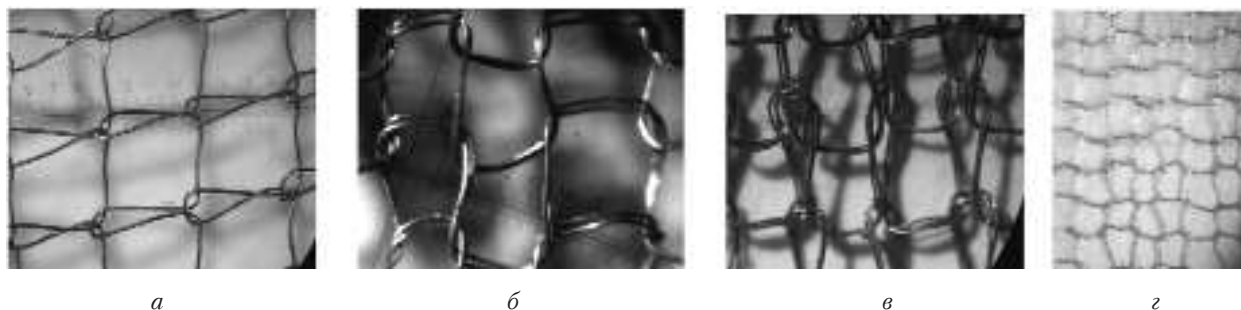


Рис. 2. Строение сетчатых медных полотен, изготовленных из: а — одной нити, б — двух нитей, в — трех нитей, г — вязано-паяная сетка из одной нити

Таблица 2

Физические и механические свойства оловянно-свинцовых припоев [4]

Марка припоя	Плотность, $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Удельное сопротивление, $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м	Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Ударная вязкость, $\alpha_n$ , кГс/см <sup>2</sup>	Твердость, НВ
ПОС-61	8,54	0,145	47	34,0	3,8	12,6
ПОС-50	8,90	0,156	38	54,0	4,59	14,9
ПОС-40	9,31	0,170	38	52,0	4,75	13,7

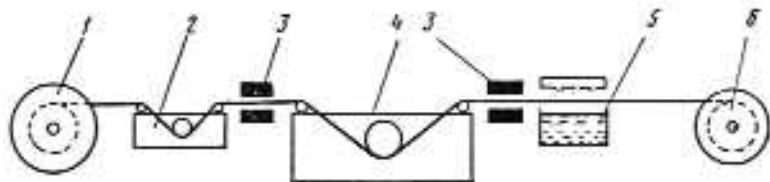


Рис. 3. Общая схема процесса лужения

попадает в ванну 4 с оловянно-свинцовым припоем. После прохождения через эту ванну она движется через протирки, снимающие излишки припоя, поступает в ванну 5 с охлаждающей водой и наматывается на катушки приемного устройства. В конструкции отдающих и приёмных катушек обычно имеются тормозные приспособления, которые создают требуемое натяжение проволок и препятствуют обрывам и запутыванию проволок, особенно при технологических остановках.

Перечисленные общие требования к операции лужения припоем ПОС-61 были реализованы на специально приспособленной для этого той же машине НО 0/2 фирмы Italia Impianti в одной технологической цепочке с волочением. С этой целью узел машины для нанесения лака был заменен на узел лужения, который был изготовлен по разработанным на ООО "Катех-Электро" чертежам, и предназначался для осуществления практически всех операций, показанных на рис. 3.

Отметим ряд технологических особенностей, которые отражаются на качестве лужения микропроволок. Так, вместо протиров (рис. 3) использовали алмазные фильеры. Кроме того, при лужении была введена операция термостабилизации — после прохождения проволоки через калибрующие фильеры. Было установлено, что термостабилизация необходима для залечивания микротрещин, образующихся на покрытии, через которые может окисляться как само покрытие, так и медный сердечник микропроволоки. В микропроводах окисление ухудшает как пластичность, так и способность проволоки к последующей пропайке в петлях сетчатого полотна. В качестве флюса в процессе очистки проволоки перед лужением нами использовался хлористый

аммоний. Следует отметить, что большое значение имеют организация защиты зеркала расплава от окисления и поддержание стабильно чистой поверхности припоя при входе в него микропроволоки. Этого достигали применением защитной среды (азот), а также поддержанием специального температурного режима припоя (360–380°С).

При отработке процесса лужения, скорость движения микропроволоки, определяющая производительность и качество нанесенного покрытия, изменяли в пределах от 2 до 6 м/сек. Было установлено, что устойчивый режим лужения по принятой технологии достигают на скорости 2,5 м/сек.

В результате отработки опытно-промышленной технологии нами был налажен серийный выпуск луженых проволок важных в практическом отношении диаметров 0,08 мм и 0,12 мм. В таблице 3 представлены свойства проволок этих диаметров.

Таблица 3

Механические свойства медных проволок, покрытых припоем ПОС-61 и пригодных для переработки на трикотажном оборудовании

Наименование	Диаметр, мм	Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %
Проволока для медной молниезащитной сетки	0,08	280–310	10–15
	0,12	280–300	12–18

Из этих проволок были изготовлены сетчатые молниезащитные полотна ПМ-0,08 и ПМ 0,12 (Полотно молниезащитное из медной микропроволоки ТУ У 28.7-24377962-005-2008), которые в результате проведенных опытно-промышленных испытаний в составе панелей и элементов конструкций из ПКМ, были рекомендованы и используются в конструкциях ряда самолетов, включая новый пассажирский самолет Ан-148.

**Выводы**

В результате проведенных поисковых и опытно-технологических работ в Украине налажен промышленный выпуск луженных медных микропроволок, из которых изготавливаются сетки трикотажной структуры для использования в конструкциях современных гражданских самолетов в качестве поверхностных молниезащитных слоев полимерных композиционных материалов.

**Литература**

1. Пат. 6198, Україна, МКИ С1 В64Д45|02. Блискавкозахисне покриття для агрегатів літального апарату: Л.Р. Вишняков, В.М. Казуров, І.М. Кохана, В.О. Коханий та ін.

2. Пат. 64651, Україна, МКИ С1 В64Д45|02, В21Д53/92. Блискавкозахисне покриття: Л.Р. Вишняков, І.М. Кохана, В.О. Коханий та ін.

3. Вишняков Л.Р., Коханая И.Н., Казуров В.Н., Катерева Т.П. Композиционные полимерные материалы с элементами молниезащиты // Технологические системы, 1999. — № 3. — С. 36–37.

4. Притою оловянно-свинцовые ГОСТ 21930-76, ГОСТ 21931-76.

5. Вишняков Л.Р., Двейрин А.З., Баранников А.М., Гринь Ю.Ф., Демиденко З.Н., Чернявский И.И. Вязаные проволочные сетки для молниезащиты углепластиков в самолетостроении: Труды Международной конференции "Композиционные материалы в промышленности", 1–5.06.2009 г.