



## ЛЁГКИЕ ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АВИАПРОВОДОВ

*Ю.А. Матвеев, начальник отдела проводниковых материалов;  
В.П. Гаврилова, ведущий инженер отдела проводниковых материалов;  
В.В. Баранов, канд. техн. наук, начальник лаборатории отдела проводниковых материалов;  
Федеральное государственное унитарное предприятие «ОКБ кабельной промышленности»*



Бортовая кабельная сеть летательных аппаратов составляет значительную долю веса объектов. Поэтому в настоящее время зарубежные фирмы и отечественные разработчики уделяют большое внимание поиску и разработке легких проводниковых материалов.

Традиционным материалом токопроводящих жил проводов и кабелей является медная проволока, и на первый взгляд кажется простым решением заменить ее на алюминиевую проволоку, имеющую в три раза меньший вес.

Тем не менее алюминий имеет по сравнению с медью свои недостатки, а именно низкие механические свойства, сложную технологию заделки проводов и кабелей в разъемы и достаточно низкую коррозионную стойкость в некоторых средах. Поэтому все исследования направлены на исключение влияния этих недостатков на характеристики авиaproводов в соответствии с требованиями заказчиков.

Повышение механических характеристик алюминия достигается его легированием различными добавками других металлов, а повышение коррозионной стойкости и облегчение заделки в разъемы – путем нанесения защитных покрытий. Так, французская фирма Filatex использует для токопроводящих жил авиaproводов проволоку из сплава алюминия с 1 % магния (АМГ-1). Всесоюзный институт легких сплавов (ВИЛС) разработал алюминиевый сплав 01417 с добавкой редкоземельных металлов, который имеет лучшую электропроводность, чем сплав АМГ-1.

В табл. 1 приведены сравнительные свойства мягкой проволоки из этих сплавов.

В настоящее время для токопроводящих жил авиaproводов применяется никелированная проволока из меди и ее сплавов.

Нанесение защитных покрытий на проволоку из алюминиевых сплавов составляет значительную сложность в силу того, что достаточно стойкая окисная пленка препятствует получению высокой адгезии покрытия.

Традиционная технология наложения гальванических покрытий на изделия из алюминиевых сплавов включает [1] следующие операции: обезжиривание, промывку, декапирование, цинкатную обработку, меднение, а затем собственно нанесение никелевого, серебряного или другого какого-либо покрытия.

При разработке технологии нанесения никелевого покрытия была использована проволока из алюминиевого сплава 01417, которая имеет лучшую электропроводность. Эксперименты по гальваническому нанесению никелевого покрытия проводились на многоходовых установках НМ-22. При этом в результате разработки оптимальных режимов электролиза и подготовки поверхности удалось получить хорошие свойства проволоки и существенно сократить трудоемкость процесса никелирования.

Разработанный метод подготовки имеет следующие преимущества по сравнению с существующими:

- сокращается время обработки поверхности;
- электролит для никелирования, применяемый для покрытия проволоки из других материалов, не загрязняется посторонними примесями, так как декапирование совместно с травлением производится в растворе, аналогичном корректировочному.

Как известно, выход по току в процессе никелирования из кислых электролитов составляет около 90 % [2], то есть на катоде одновременно с никелем выделяется водород. Это приводит к хрупкости никелевого покрытия, поэтому возникает проблема удаления водорода и придания пластичности покрытию. Эта задача в общем случае решается термообработкой изделий.

Таблица 1

Марка сплава	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Удельное электрическое сопротивление, Ом · мм <sup>2</sup> /м
АМГ-1	165	8	0,0570
01417	160	8	0,0320

Таблица 2

Диаметр проволоки, мм	Толщина никелевого покрытия, мкм	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Временное сопротивление разрыву, $\sigma$ , кг/мм <sup>2</sup>	Удельное электрическое сопротивление, Ом · мм <sup>2</sup> /м
0,26	5,4	6,5	15,7	0,032
0,26	5,2	6,5	16,0	0,032
0,26	5,0	7,0	16,0	0,032

Таблица 3

Диаметр проволоки, мм	Толщина никелевого покрытия, мкм	После никелирования			После электроимпульсной обработки никелированной проволокой		
		Относительное удлинение, $\delta$ , %	Временное сопротивление разрыву, $\sigma$ , кг/мм <sup>2</sup>	Удельное электрическое сопротивление, Ом · мм <sup>2</sup> /м	Относительное удлинение, %	Временное сопротивление разрыву, кг/мм <sup>2</sup>	Удельное электрическое сопротивление, Ом · мм <sup>2</sup> /м
0,26	5,2	0,9	23,0	0,033	8,0	16,5	0,032
0,26	5,4	0,6	23,8	0,034	8,5	17,0	0,032
0,42	5,0	1,6	25,4	0,034	10,0	16,4	0,032
0,42	5,1	1,6	25,5	0,034	8,0	16,5	0,032

Для достижения уровня свойств никелированной проволоки из алюминиевого сплава 01417, отвечающих техническим требованиям ( $\delta \geq 5\%$ ,  $\sigma \geq 12$  кг/мм<sup>2</sup>, удельное электрическое сопротивление  $\leq 0,036$  Ом · мм<sup>2</sup>/м), после нанесения покрытия необходим отжиг. Отжиг в шахтной печи не позволяет достичь необходимых результатов. Это связано с большой разницей температур плавления *Al* (660 °С) и *Ni* (1450 °С) и температур рекристаллизации для *Al* (200–250 °С) и для *Ni* (600–650 °С), а также с активной взаимной диффузией на границе *Al-Ni* с образованием хрупкого интерметаллического слоя.

Отжиг на проход на установке ПО-24 показал возможность достижения необходимого уровня свойств (табл. 2), но не позволяет полностью решить вопрос прочности сцепления никелевого покрытия с основой.

Навивание на стержень 3-кратного диаметра дает отрицательный результат (по ГОСТ 9.302–88). Анализ литературных данных позволил остановиться на электроимпульсной обработке (ЭИО) как перспективной для повышения пластичности защитного никелевого покрытия на алюминиевом сплаве.

В работах [3–6] показано влияние переменного тока плотностью 100–200 А/мм<sup>2</sup> и  $\tau = 10^{-2}$ – $10^{-3}$  с на пластичность стали 45 и сплавов Д16, АМц. Относительное удлинение за счет действия тока можно повысить на 30–40 %. Литературные данные по обработке алюминиевой проволоки с защитным никелевым покрытием (или аналогичных систем) электрическим импульсом отсутствуют.

Для решения поставленной задачи была изготовлена макетная установка ЭИО, которая состоит из следующих узлов:

- источник питания – трансформатор (380–30 В),
- шкаф управления,
- прерыватель тока с тиристорным блоком,

- узел отжига,
- приемник,
- датчик.

Проводилась электроимпульсная обработка проволоки из алюминиевого сплава 01417 (ТУ-1-809-1038–96)  $\varnothing$  0,26,  $\varnothing$  0,42 мм с никелевым покрытием 5 мкм.

В табл. 3 представлены результаты определения физико-механических свойств проволоки после ее никелирования и после электроимпульсного отжига никелированной проволоки.

Все образцы проволоки после электроимпульсного отжига выдержали испытания на прочность сцепления покрытия согласно п. 5.6 ГОСТ 9.302–88.

Таким образом, разработана технология никелирования и термообработки проволоки из алюминиевого сплава 01417 и проведены всесторонние испытания ее физико-механических свойств.

## ЛИТЕРАТУРА



1. Верник С., Пиннер Р. Химическая и электролитическая обработка алюминия его сплавов. Л., 1960.
2. Лукомский Ю.Я., Горшков В.К. Гальванические и лакокрасочные покрытия на алюминии и его сплавах. Л., 1985.
3. Троицкий О.А., Спицын В.И., Соколов Н.В., Рыжов В.Г. Электропластическое волочение нержавеющей стали // ДАН СССР. 1977. Т. 237. № 5. С. 1082–1085.
4. Спицын В.И., Троицкий О.А., Гусев Е.В., Курдюков В.К. Электропластическая деформация нержавеющей стали // Известия АН СССР. Сер. Металлы. 1974. № 2. С. 123–126.
5. Троицкий О.А. Возможность применения электропластического эффекта для повышения пластичности электротехнических материалов // Кабельная техника. 1977. № 7 (149). С. 17–20.
6. Рыжов В.Г., Соколов Н.В., Троицкий О.А. Генераторы импульсного тока для исследования электропластической деформации металла // Электронная обработка материалов. 1979. № 3. С. 81–82.