

УДК 620.17**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЛУЖЕНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ВОЛОЧЕНИЕМ, СОВМЕЩЕННЫМ С КОНТАКТНЫМ ОТЖИГОМ**Бобель Ольга Витальевна⁽¹⁾, Сафронова Екатерина Андреевна⁽²⁾*Студент 5 курса⁽¹⁾,**кафедра «Материаловедение»**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**АО «Особое Конструкторское Бюро Кабельная Промышленность»⁽²⁾**Научный руководитель: К.О. Базалева**кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Материаловедение»***Введение**

Кабельные изделия эксплуатируются в самых различных условиях, в том числе в экстремальных; они находят применение в авиационной, космической, радиоэлектронной промышленности и многих других отраслях техники. В основе любого кабеля лежит проволока, и она определяет свойства кабеля. В условиях непрерывно развивающегося научно-технического прогресса необходимо постоянно совершенствовать технологию производства проволоки.

Одним из эффективных способов повышения надежности деталей машин и механизмов является нанесение на рабочую поверхность различных покрытий.

Целью данной работы является исследование свойств медной луженой проволоки, изготовленной путем гальванического лужения с последующим волочением, совмещенным с контактным отжигом. Необходимо сделать вывод о рациональности и возможности применения данного метода лужения в сравнении с используемой технологии горячего лужения.

Материалы и методики

Оценка механических свойств и качества покрытия медной проволоки производилась согласно установленным ТУ, которые приведены в таблицах 1 и 2. В таблице 1 представлены контролируемые механические свойства: σ_b – временное сопротивление разрыву, МПа и δ – относительное удлинение, %, для различных диаметров. В таблице 2 представлены номинальные размеры проволоки, допустимые отклонения и требуемая толщина покрытия. В таблице 3 представлено максимальное значение удельного электросопротивления для медной луженой проволоки.

Таблица 1. Механические свойства

Ø, мм	σ_b , не менее, МПа (кг)	δ , не менее, %
до 0,09	196 (20)	-
0,10-0,14	196 (20)	-
0,15-0,24	196 (20)	5
0,25-0,39	196 (20)	5

Таблица 2. Номинальный размер и толщина покрытия проволоки

Ø, мм	Верхний допуск	Нижний допуск	Толщина покрытия (не более), мкм
до 0,05	+0,006	-0,002	2
св. 0,05-0,20	+0,007	-0,003	2
0,20-0,25	+0,009	-0,005	2
0,25-0,30	+0,010	-0,005	2,5
0,30-0,40	+0,012	-0,007	2,5
0,40-0,70	+0,016	-0,010	3
0,70-0,99	+0,023	-0,015	4

Таблица 3. Значение удельного электросопротивления для медной луженой проволоки

ρ, мкОм·м	при температуре 20°C не более 0,0176
-----------	--------------------------------------

Для исследования свойств были изготовлены образцы медной луженой проволоки следующих диаметров с разной толщиной покрытия, представленные в таблице 4.

Таблица 4. Диаметры и толщина покрытия заготовок и изделий для исследования

Диаметр заготовки, мм	Заданная толщина покрытия, мкм	Диаметр изделия, мм
0,30	1	0,10
		0,12
	3	0,10
		0,10
	5	0,12
		0,10
0,70	3	0,26
	5	

Отбор и испытание образцов производилось в соответствии с ГОСТ 16931-71. При отборе следует иметь в виду, что проволока не должна иметь механических повреждений;

образцы должны быть смотаны без растяжений, изломов, изгибов и повреждений покрытия. Для испытаний необходимо отбирать не менее 3 образца.

Для определения фактической толщины покрытий проволоки используют 2 основных метода: гравиметрический и металлографический анализы.

Гравиметрический анализ (весовой анализ) — основной метод количественного химического анализа. Этот метод основан на законе сохранения массы веществ при химических превращениях и включает в себя следующие этапы:

- взвешивание образцов и погружение их в раствор;
- перевод определяемого вещества в осадок (олово);
- отделение оловянного осадка от раствора фильтрованием и удаление примесей промыванием;
- перевод осажденной формы в весовую (гравиметрическую) форму;
- взвешивание осадка на аналитических весах;
- расчёт результатов анализа с учетом длины образца и его диаметра, массы до и после погружения в раствор.

Металлографический анализ образцов выполнялся на микроскопе типа ПМТ-3 при увеличении $\times 100$. Для проведения металлографического анализа образцов медной проволоки получали шлифы следующим образом: акриловую смолу DuroCit смешивали с отвердителем в пропорции 2:1, перемешивали и заливали в форму; пучки проволоки вертикально помещали в смолу до полного затвердевания (15 мин). Данная стадия изготовления шлифа представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Заливка шлифа

Далее извлекали полученные шлифы из формы; шлифовали плоскую поверхность образца на шлифовальной машине Struers TegraPol-11 с использованием водных суспензий различной дисперсности; промывали шлиф водой и травили хлористым железом.

Относительное удлинение и временное сопротивление разрыву определялись на автоматизированной разрывной машине с построением диаграмм растяжения образцов. Погрешности измерений составляли $\pm 1\%$ при измерении нагрузки и $\pm 2\%$ при измерении относительного удлинения.

Удельное электросопротивление – физическая величина, характеризующая способность вещества препятствовать прохождению электрического тока. Удельное электросопротивление проволоки определяют на образцах фиксированной длиной 1 м на специальном приборе. Концы проволоки подключают к клеммам прибора и замеряют удельное электросопротивление при пропускании тока через неё.

Результаты и выводы

Результаты измерения механических и электрических свойств медной луженой проволоки, полученной методом гальванического лужения с последующим волочением, совмещенным с контактным отжигом, представлены в таблице 5. На рисунке 2 представлены

диаграммы механических свойств для каждого диаметра с соответствующей толщиной покрытия. Зеленой линией на диаграмме показано минимально возможное значение измеряемой величины.

Таблица 5. Результаты измерения механических и электрических свойств проволоки

Марка	Диаметр мм	Заданная т.п. ¹ , мкм	δ , %	σ , МПа	ρ , Ом·мм ² /м
ММЛ ²	0,12	1	18,5 - 21,5	260,0 - 261,3	0,0174
			21,5 - 24,5	234,0 - 242,7	-
		3	13,1 - 13,8	267,2 - 270,5	0,0184
			12,5 - 14,0	247,1 - 255,8	-
		5	12,2 - 14,6	247,3 - 252,9	0,0194
			14,5 - 20,5	212,4 - 216,8	-
	0,10	1	19,7 - 22,2	264,8 - 268,9	0,0167
			17,5 - 21,0	243,4 - 249,6	-
		3	10,9 - 16,6	264,4 - 268,0	0,0177
			14,2 - 18,4	257,07 - 262,8	0,0176
		5	16,5 - 20,0	237,16 - 249,6	-
			10,6 - 12,7	269,4 - 271,5	0,0187
	0,26	3	17,5 - 23,4	246,4 - 250,6	0,0174
			19,9 - 22,5	246,3 - 246,5	0,0173
		5	21,5 - 28,0	227,2 - 230,9	-
			15,7 - 21,8	242,2 - 250,7	0,0178
		5	18,0 - 20,7	243,5 - 246,2	0,0177
			20,5 - 22,0	227,2 - 230,9	-

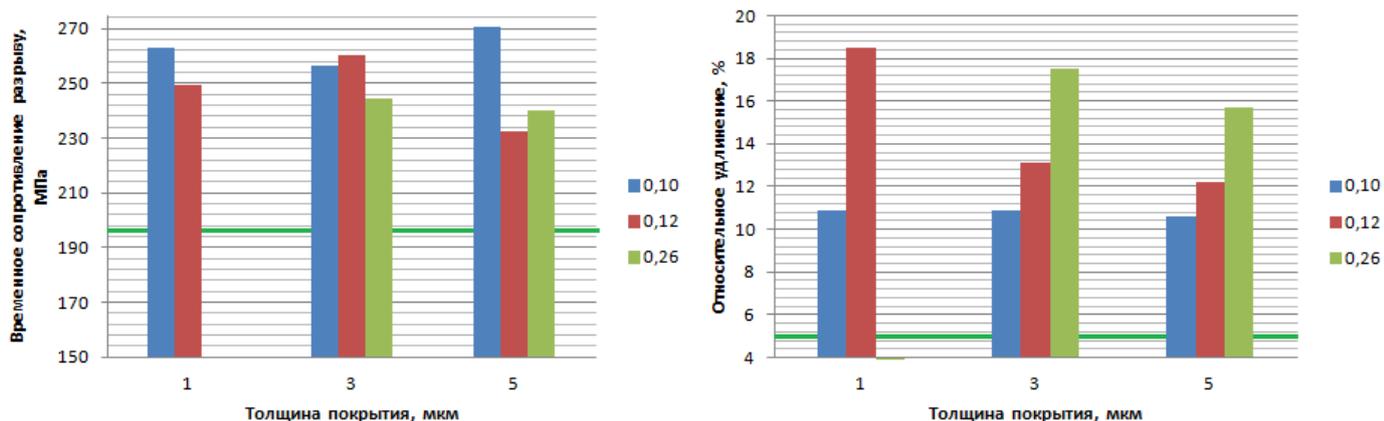


Рис. 2. Диаграммы механических свойств

Как видно из диаграмм, проволоки всех диаметров отвечают требованиям ТУ по механическим свойствам. Были исследованы зависимости механических свойств (временного сопротивления разрыву и относительного удлинения) от величины напряжения отжига. Для

¹ т.п. – толщина покрытия

² ММЛ – медь мягкая лужёная

проволоки диаметром 0,26 мм с толщиной покрытий 3 и 5 мкм результаты представлены на рисунках 3 и 4.

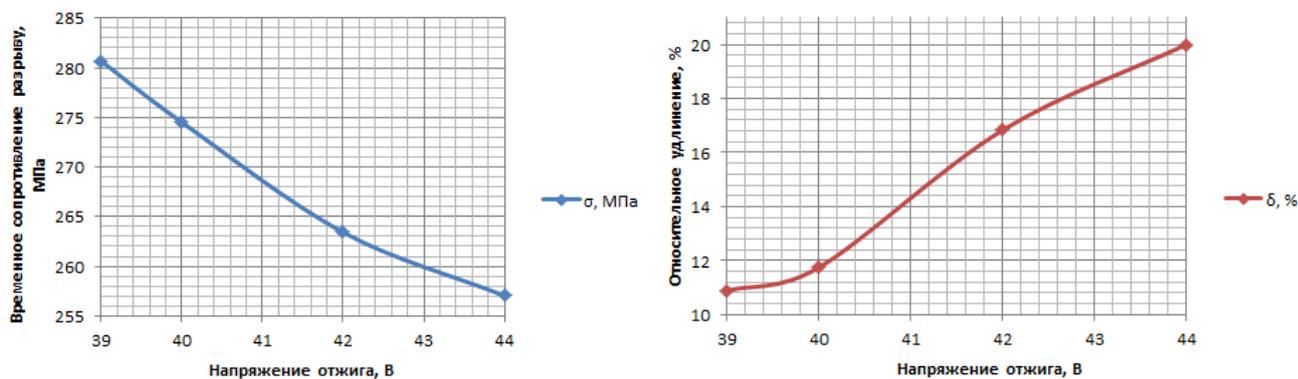


Рис.3. Зависимость временного сопротивления разрыву (σ , МПа) и относительного удлинения (δ , %) от напряжения отжига (U , В) проволоки \varnothing 0,26 (т.п. 3 мкм)

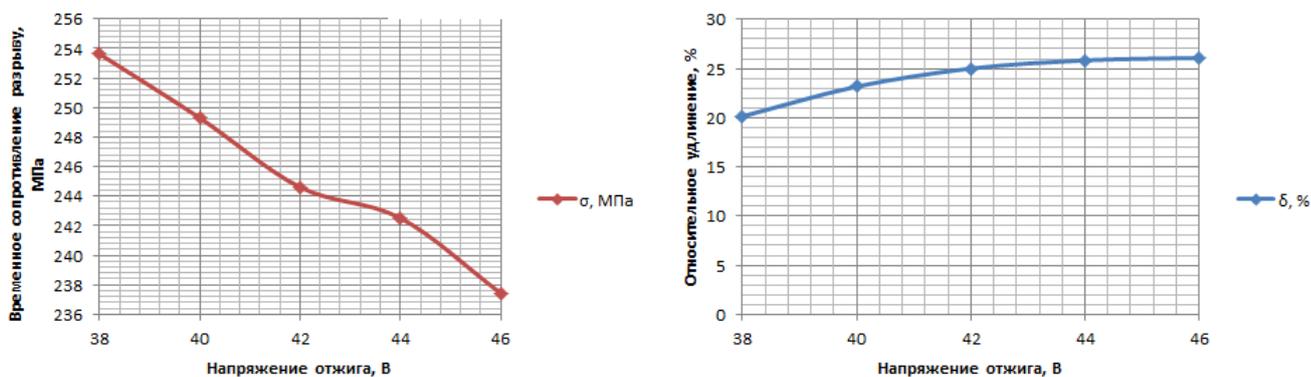


Рис.4. Зависимость временного сопротивления разрыву (σ , МПа) и относительного удлинения (δ , %) от напряжения отжига (U , В) проволоки \varnothing 0,26 (т.п. 5 мкм)

Из графиков видно, что не зависимо от толщины покрытия при увеличении напряжения отжига относительное удлинение проволоки возрастает, а временное сопротивление разрыву падает.

Результаты металлографического анализа образцов проволоки различного диаметра с покрытиями разной толщины приведены на рисунках 5 - 9.

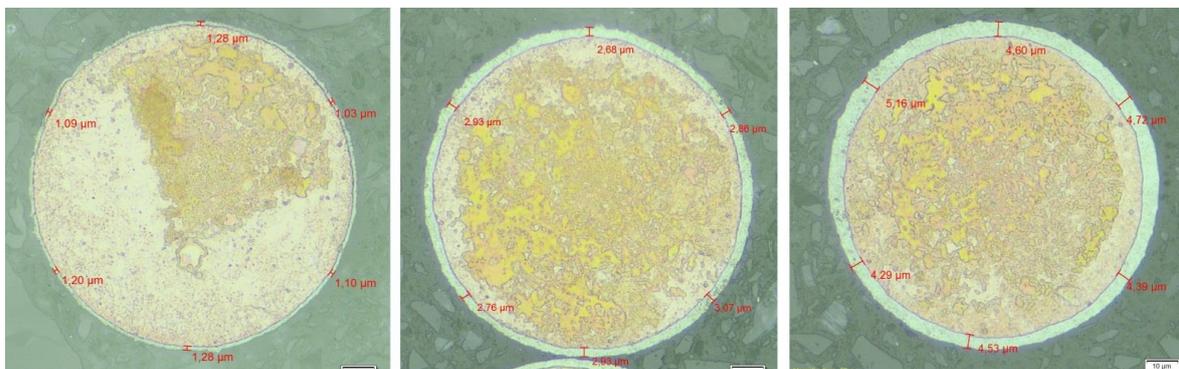


Рис. 5. Проволока \varnothing 0,10 с толщиной покрытия соответственно 1, 3, 5 мкм

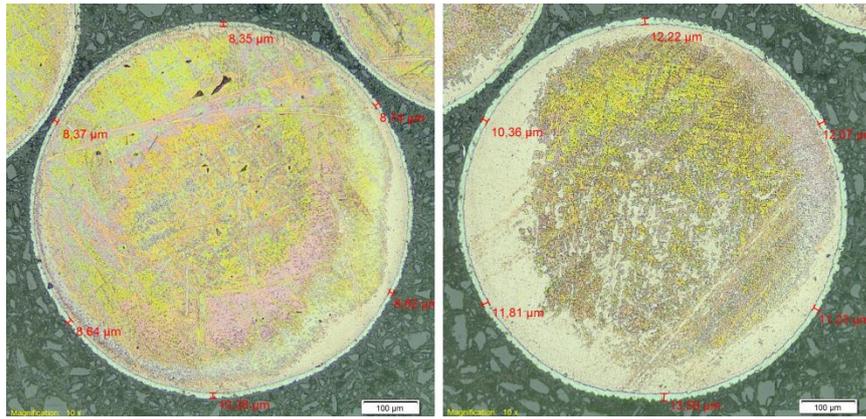


Рис. 9. Проволока Ø 0,70 с толщиной покрытия соответственно 3, 5 мкм

При анализе шлифов были выявлены фактические толщины плакирующего слоя; результаты этого определения представлены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6. Результаты определения фактической толщины покрытия проволоки Ø 0,10; 0,12; 0,26

Диаметр, мм	Заданная т.п., мкм	Фактическая толщина покрытия, мкм	
		Гравиметрический анализ	Металлографический анализ
0,10	1	1,16	1,14
	3	2,96	2,87
	5	4,61	4,72
0,12	1	1,00	1,02
	3	2,48	2,46
	5	4,48	4,49
0,26	3	3,10	3,88
	5	4,95	5,20

Таблица 7. Результаты определения фактической толщины покрытия проволоки Ø 0,30; 0,70

Диаметр заготовки, мм	Заданная т.п., мкм	Фактическая толщина покрытия, мкм	
		Гравиметрический анализ	Металлографический анализ
0,30	1	2,65	2,65
	3	8,15	7,70
	5	13,25	11,61
0,70	3	7,90	8,81
	5	11,02	11,70

В результате сравнения образцов выявлено, что фактическое значение толщины покрытия превышает заданное. Изготовление проволоки с оловянным покрытием осуществлялось на установке для гальванического нанесения покрытия по существующей программе для Ni, электрохимический эквивалент которого в 2 раза меньше

электрохимического эквивалента олова (электрохимический эквивалент вещества, мг/Кл – величина, показывающая, какая масса этого вещества выделится на электроде при электролизе в результате прохождения заряда в 1 Кулон). Электрохимический эквивалент олова и никеля представлен в таблице 8.

Таблица 8. Электрохимический эквивалент олова и никеля

Химический элемент	Электрохимический эквивалент, мг/Кл
Олово	0,62
Никель	0,30

Таким образом, при лужении на этой установке при одной и той же заданной толщине покрытия олова оседает в 2 раза больше, чем никеля, что объясняет завышенное фактическое значение толщины оловянного покрытия.

Анализ шлифов изделий и заготовок показал, что проволоки $\varnothing 0,10$ и $\varnothing 0,12$ мм со средней фактической толщиной плакирующего слоя соответственно 1,15 мкм и 1,01 мкм имеют технологические значения фактической толщины покрытия, временного сопротивления разрыву, относительного удлинения и удельного электросопротивления, отвечающие требованиям ТУ. Остальные образцы имеют завышенную толщину покрытия, и не отвечают требованиям ТУ.

Медная гальванически луженая проволока после волочения с последующим контактным отжигом соответствует по механическим и электрическим свойствам требованиям ТУ.

Модернизация программы и повторный отбор опытных образцов позволит изготовить проволоку с оловянным покрытием различных диаметров, отвечающую всем требованиям ТУ.

Заключение

Проведены испытания механических и электрических свойств луженой медной проволоки, а также ее металлографический анализ. В рамках проведенного исследования были получены выводы о зависимости механических свойств от режима отжига и было изучено качество получаемого покрытия. В настоящий момент невозможно сделать вывод о пригодности метода гальванического лужения для изготовления проволок и кабелей всех назначений, особенно используемых в экстремальных условиях. Необходим ряд дальнейших испытаний и исследований.

Литература

1. Вячеславов П.М. Основы гальванотехники, – 1960г.
2. пер. с нем. Н.Б. Сциборовская Справочное руководство по гальванотехнике — 1969г.
3. Л.С. Ейльман, М.Б. Кнастер Защита проводов и кабелей от коррозии, – 1972г.
4. Лайнер В.И. Современная гальванотехника, – 1967г.
5. Белоруссова Н.И., Пешкова И.Б. Производство кабелей и проводов, – 1981г.