

А.А. Хмыль<sup>1</sup>, проф., д-р техн. наук;  
И.И. Кузьмар<sup>1</sup>, канд. техн. наук;  
А.М. Гиро, канд. физ.-мат. наук;  
Д.В. Шелег<sup>1</sup>, магистрант, Д.Я. Гусаков<sup>2</sup>, гл. инженер  
(<sup>1</sup>БГУИР, г. Минск, <sup>2</sup>ООО «СЕОМ электро»)

## **СЕРЕБРЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОМПЛЕКТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

В промышленности для изготовления электрических контактов широко применяются в качестве основы такие металлы как медь и сплавы на ее основе, которые для улучшения функциональных свойств покрываются электрохимическими покрытиями. Благодаря низкой стоимости, высокой электропроводности и коррозионной стойкости, хорошей паяемости как на низковольтные, так и на высоковольтные контакты наносят серебряные покрытия. Но требования, которые предъявляются к покрытиям высоковольтных контактов, являются более жесткими, так как они должны надежно работать в условиях электрической эрозии и повышенных температурных полей, которые возникают при размыкании и замыкании таких контактов.

Контактные детали для высоковольтных устройств в процессе их изготовления проходят ряд технологических операций, под действие которых существенно изменяется структура и эксплуатационные свойства применяемых материалов: образование высокоразвитой поверхности в виде заусенец, повышение внутренних напряжений, укрупнение зерна, образование жировых и оксидных пленок. Перед нанесением функциональных электрохимических покрытий все дефекты и загрязнения на их поверхности должны быть удалены для обеспечения высокой адгезионной прочности и надежной работы в течение заданного периода времени. Одним из путей повышения точности, надежности, износо- и коррозионной стойкости прецизионных сопряжений является выбор оптимального способа финишной обработки контактирующих поверхностей и подвижных сопряжений, от характера и качества которой во многом зависит качество формируемых гальванических покрытий.

Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) было исследовано влияние метода полирования латуни и меди на микрогеометрические параметры поверхности контактных деталей. Химическое и электрохимическое полирование осуществляли в стандартных растворах

[1], а электролитно-плазменную обработку (ЭПО) – в водном растворе солей натрия и аммония, нагретом до 80-90°С при рабочем напряжении 275 В в течение 5 минут. Анализ полученных данных (табл. 1) показывает, что механическое полирование поверхностей детали обеспечивает получение наименьших значений высотных параметров, но при этом на ней отчетливо наблюдаются следы прохождения абразивного инструмента. В то же время контактное сопротивление для этих образцов на порядок выше, чем для образцов, полученных другими способами обработки, что можно объяснить наличием на поверхности загрязнений в виде адсорбционных пленок, а также повышением внутренних напряжений в поверхностном слое [2].

**Таблица 1 – Влияние вида обработки на микрогеометрические параметры поверхности латуни Л62 и меди М1**

Вид обработки	Среднеквадратичная высота микронеровностей, нм		Максимальная высота микронеровностей, нм		Средний угол наклона микропрофиля, град	
	Л62	М1	Л62	М1	Л62	М1
Исходная поверхность	157,9	130,9	33,8	29,1	24,7	22,0
Механическое полирование	3,26	4,11	4,47	6,5	1,8	1,8
Химическое полирование	58,7	23,2	11,35	8,3	6,9	7,5
Электрохимическое полирование	5,74	7,4	7,94	8,1	1,6	1,8
Электролитно-плазменная обработка	3,4	5,9	4,46	6,9	11,6	10,3

При химическом полировании происходит некоторое сглаживание поверхности по сравнению с исходной, но она значительно грубее, чем при механическом полировании. На поверхности также можно заметить границы отдельных зерен, так как на этих участках химическое действие растворов происходит наиболее активно.

При электрохимическом полировании под влиянием электрического тока поверхность становится более гладкой, так как удаление металла происходит не только по границам зерен, но и по самому кристаллу.

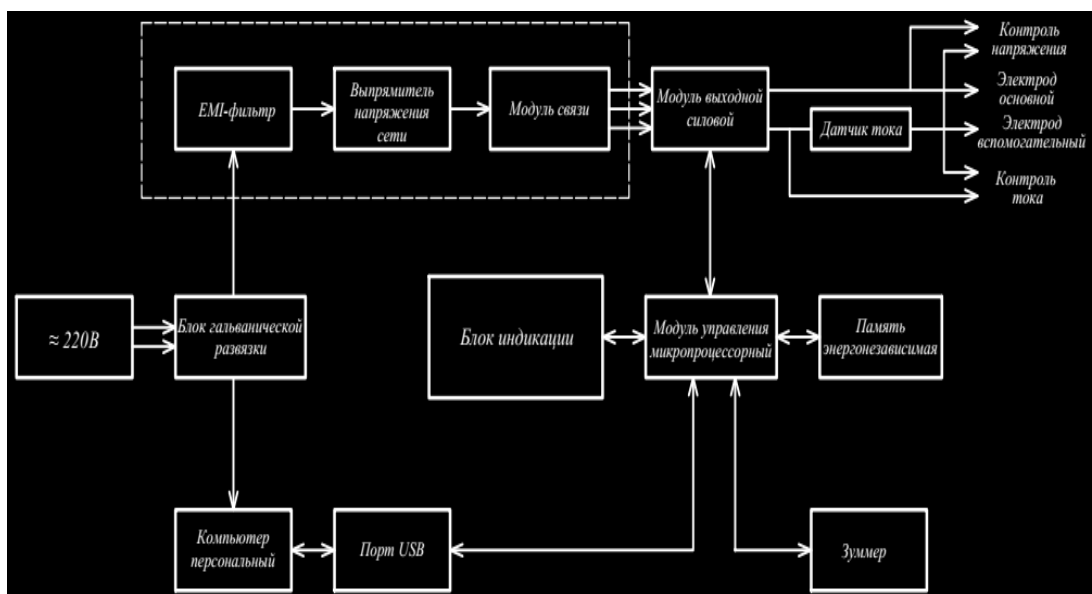
Погружение полируемого изделия под высоким напряжением в электролит приводит к тому, что между отдельными участками поверхности и другим электродом, находящимся в электролите, возникает электрический разряд. Высокая температура в области разряда

приводит к микроиспарению металла на границе раздела между вершинами микровыступов и электролитом. Поверхность изделия покрывается парогазовой оболочкой и электрические разряды происходят уже между этой оболочкой, не имеющей кристаллической шероховатости, и обрабатываемой поверхностью, что и приводит к процессу полирования. Если критерием гладкости поверхности считать достижение минимальных отклонений высоты и максимальной пологости топографии, то на основании полученных данных можно утверждать, что ЭПО является более эффективной подготовительной операцией перед нанесением электрохимических покрытий по сравнению с другими методами обработки латуни и меди. Кроме того, в качестве электролитов при этом используются водные растворы экологически безопасных и недорогих веществ; отсутствует контактно-механическое воздействие на деталь во время обработки, имеется возможность совмещения, травления, удаления загрязнений и полирования, снижение внутренних напряжений в поверхностных слоях детали.

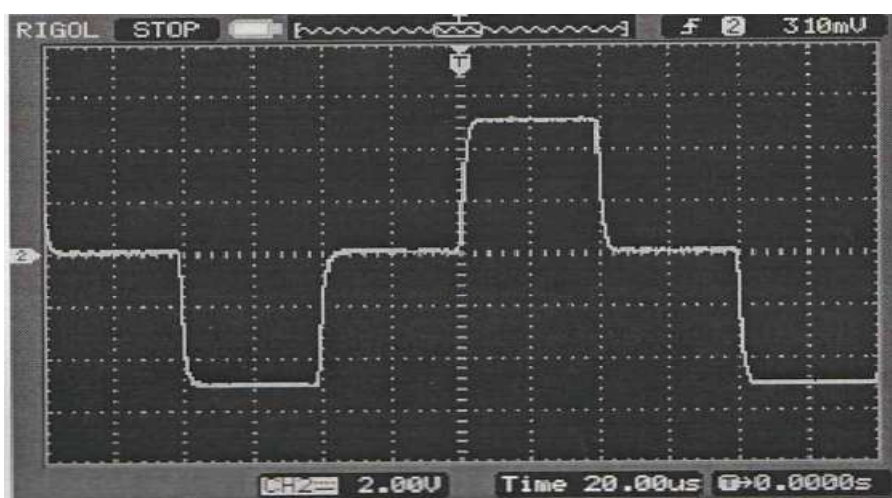
Для проведения исследования функциональных свойств на тестовые образцы из меди, прошедшие подготовительные операции, включая ЭПО, наносили серебряные слои толщиной 6 мкм. Осаждение проводилось в железистосинеродистом электролите следующего состава, г/л:  $\text{AgNO}_3$ - 30-50,  $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ - 50-100,  $\text{KCNS}$ - 60-120,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ - 20-40 при температуре  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  в условиях нестационарного электролиза. Использование импульсно-реверсных токов является, как известно, наиболее эффективным, так как при этом формируется мелкокристаллическая и плотноупакованная структура наносимых слоев с высокими топографическими и эксплуатационными свойствами [2].

Структурная электрическая схема программируемого источника питания (ПИП) приведена на рис. 1. Он предназначен для генерирования импульсов, током до  $\pm 5\text{A}$  и напряжением до  $\pm 15\text{B}$  при нанесении однослойных и многослойных функциональных покрытий и обеспечивает автоматизированное управление электролизом по заранее составленной программе, хранящейся в памяти микропроцессорного модуля устройства или созданной с помощью персонального компьютера. Осциллограмма напряжения на выходе ПИП показана на рис.2.

Анализ данных исследований, приведенных в табл. 2, показывает, что и способ подготовки и способ осаждения покрытий оказывают сложное влияние на все функциональные свойства контактных деталей. Учет этого влияния позволяет расширить возможности управления процессом и оптимизировать технологию осаждения покрытий для конкретных целей.



**Рисунок 1 – Структурная схема ПУ, ее описание и возможности программирования режимов**



**Рисунок 2 – Осциллограмма напряжения на выход программируемого источника питания**

Использование электролитно-плазменной обработки для реальных контактов типа «тюльпан», устанавливаемых в высоковольтную ячейку КРУ-0.5-ЭМ, и последующее серебрение импульсно-реверсными токами позволило увеличить гарантированную работоспособность ячейки с 2000 до 2600 переключений и снизить контактное сопротивление на 18%.

**Таблица 2 – Влияние методов подготовки и формирования серебряных покрытий на их функциональные свойства**

Вид обработки*	Форма тока	Микро твердость Нм, мН/м <sup>2</sup>	Износостойкость, W, 10 <sup>-6</sup> нм <sup>3</sup>	Контактное сопротивление, R <sub>к</sub> , мкОм
Механическое полирование	ПТ	940	4,11	29,3
	ИТ	4450	1,92	34,3
	РТ	1300	2,17	31,1
Химическое полирование	ПТ	870	4,62	17,3
	ИТ	1280	4,07	21,7
	РТ	1250	3,77	19,5
Электрохимическое полирование	ПТ	905	3,95	17,5
	ИТ	1310	3,28	20,9
	РТ	1260	2,90	19,7
Электролитно плазменная обработка	ПТ	910	2,11	14,3
	ИТ	1330	1,89	16,7
	РТ	1280	1,51	13,9

\*AgNO<sub>3</sub> – 40 г/л:  $i_k = 0,3 \text{ А/дм}^2$ ;  $i_k^{ITT} = 3 \text{ А/дм}^2$  (q = 10, f = 1 Гц)  $i_k^{PT} = 3 \text{ А/дм}^2$  (q = 10, f = 1 Гц,  $\frac{i_k}{i_a} = 5$ )

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Грилихес С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / Под ред. Вячеслава П.М. – Л.: Машиностроение, 1985. – 101 с.
- 2 Хмыль, А.А. Гальванические покрытия в изделиях электроники / Хмыль А.А., Ланин В.Л., Емельянов. Минск: Интегралполиграф, 2017. – 480 с.

УДК 66.087

G. Steude, student, TUD, Dresden  
 V.V. Zhylinski, assoc. professor, Ph.D.  
 H.N. Supichenka assoc. professor, Ph.D.  
 Technische Universität Dresden, 01069, Dresden,  
 Belarusian State Technological University, Minsk, 220006, Belarus

#### ELECTROCOAGULATION OF FLUORIDE FOR CLEANING WATER

Electrocoagulation is used as an electrochemical water treatment whereby sacrificial anodes corrode to release active coagulant precursors (usually aluminum or iron cations) into solution. The accompanying electrolytic reactions evolve gas (e.g. hydrogen) at the cathode. Electrocoagula-