

Говако Александр Сергеевич, магистрант,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ИГОЛЬЧАТЫХ КОНТАКТОВ ДЛЯ ЗОНДОВЫХ СТАНЦИЙ ДИАГНОСТИКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

**Аннотация.** В работе рассмотрена проблема деградации игольчатых контактов в системах внутрисхемного контроля. Проведён сравнительный анализ трёх основных групп сплавов – бериллиевой бронзы CuBe<sub>2</sub>, вольфрам-рениевого сплава W-Re (3% Re) и палладиевого сплава Paliney 7 – по комплексу эксплуатационных критериев: циклической износостойкости, стабильности переходного сопротивления и устойчивости к адгезионному схватыванию.

**Ключевые слова:** Печатная плата, износостойкость, игольчатый контакт, стенд для диагностики печатных плат.

### Введение:

Функциональная и параметрическая диагностика печатных плат (ПП) на контрольных точках неразрывно связана с качеством электрического контакта между измерительным щупом и контактной площадкой платы. Игольчатый контакт является критическим элементом стенда, от которого зависят достоверность измерений, быстродействие и экономическая эффективность тестирования. В условиях серийного контроля щупы подвергаются тысячам и десяткам тысяч циклов зондирования, что приводит к их износу. Целью данной работы является систематизация требований и обоснование выбора материала иглы для различных условий эксплуатации.

Для наглядного обоснования выбора материала зонда проведём прямое сравнение трёх основных групп сплавов – бериллиевой бронзы (CuBe<sub>2</sub>), вольфрам-рениевых композиций (W-Re) и палладиевого сплава Paliney 7 – по комплексу наиболее значимых в производственных условиях критериев, которые описаны ниже:

1. Сопротивление износу при тестировании оловянных покрытий (HASL, иммерсионное олово)

Наибольшую проблему представляет адгезионное схватывание и перенос мягкого олова на иглу. Бериллиевая бронза здесь практически непригодна: уже после 50 тыс. циклов наблюдается образование наростов и резкое увеличение переходного сопротивления. Вольфрам-рениевые иглы служат значительно дольше (до 350–400 тыс. касаний) благодаря высокой твёрдости и инертности к олову, однако со временем на них всё же накапливаются оксидные плёнки, требующие периодической механической очистки. Палладиевый сплав Paliney 7, напротив, демонстрирует уникальную способность к формированию тонкого стабильного интерметаллидного слоя, который не растёт бесконтрольно и не ухудшает контакт; ресурс в паре с оловом может достигать 600 тыс. циклов без промежуточной очистки.

2. Работа по золотым покрытиям (ENIG, ENEPIG).

Золото не образует прочных интерметаллидов с большинством металлов, поэтому основным фактором становится механическое истирание и упругое последствие. Здесь наилучший баланс обеспечивает бериллиевая бронза с золотым покрытием: малое и стабильное сопротивление контакта, низкая термо-ЭДС. Однако её мягкость ограничивает срок службы до ~100-150 тыс. циклов из-за расплющивания острия. Вольфрам-рениевые иглы по золоту служат дольше, но дают несколько более высокое и шумящее сопротивление.



Палладиевые сплавы по золоту также стабильны, однако их стоимость делает применение оправданным только для прецизионных измерений.

### 3. Поведение на иммерсионном серебре

Серебро склонно к сульфидизации, и здесь критична химическая инертность иглы. Вольфрам-рений, несмотря на твердость, склонен катализировать образование непроводящей пленки сульфида серебра на острие, что быстро выводит контакт из строя. Бериллиевая бронза химически более нейтральна, но быстро изнашивается. Палладиевые сплавы выигрывают за счёт отсутствия каталитической активности к сере и образования стабильных соединений, что обеспечивает наибольший срок службы.

### 4. Электрические характеристики

По абсолютному значению удельного сопротивления лидирует бериллиевая бронза ( $6\text{--}8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м), за ней следует вольфрам-рений ( $15\text{--}20 \cdot 10^{-8}$  Ом·м), и замыкает список палладиевый сплав ( $28\text{--}32 \cdot 10^{-8}$  Ом·м). Однако в реальных условиях переходное сопротивление определяется не столько объёмным сопротивлением иглы, сколько состоянием контактного пятна, поэтому при тестировании «грязных» покрытий (олово, серебро) более высокоомный палладий за счёт чистоты пятна часто показывает не худшие, а лучшие результаты, чем низкоомная бронза. По электрическому шуму для цифровых тестов (годен/негоден) сопротивление 50-100 мОм допустимо (хватает W-Re). Для прецизионных аналоговых измерений требуется материал с низкой термо-ЭДС и сопротивлением. Здесь предпочтительна CuBe2 с золотым покрытием иглы, несмотря на ее быстрый механический износ.

Таблица 1

Сравнительные характеристики материалов игольчатых контактов

Параметр	CuBe2	W-Re (3% Re)	Paliney 7
Твёрдость, HV	350-420	550-650	300-380
Удельное сопротивление, $10^{-8} \Omega \cdot m$	6.0-8.0	15.0-20.0	28.0-32.0
Термическая стабильность	Средняя	Очень высокая	Высокая (инертность)
Стабильность переходного сопротивления	Средняя	Средняя	Высокая
Необходимость очистки	Частая	Периодическая	Минимальная
Ресурс по олову (тыс. циклов)	~50	~350	~600
Ресурс по золоту (ENIG)	~150	~400	~500
Ресурс по иммерсионному серебру	~100	~80	~450

По итогам сравнительного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что ни один из рассмотренных материалов не является универсальным для всего спектра финишных покрытий. Эффективность контактной пары определяется не столько абсолютными значениями твердости или удельного сопротивления, сколько характером физико-химического взаимодействия в микрообласти контакта при циклическом нагружении.

2. Прямое сравнение бериллиевой бронзы CuBe2, вольфрам-рениевого сплава W-Re (3% Re) и палладиевого сплава Paliney 7 выявило принципиальное различие в механизмах деградации. Бериллиевая бронза, несмотря на наилучшую электропроводность и низкую термо-ЭДС, демонстрирует ресурсные ограничения из-за интенсивного адгезионного износа (менее 50 тыс. циклов на олове, около 150 тыс. на золоте) и требует частой замены или



промежуточной очистки. Вольфрам-ренийевый сплав обеспечивает многократно более высокую износостойкость (до 350 тыс. циклов на олове, до 400 тыс. на золоте), однако на оловянных и особенно серебряных покрытиях склонен к накоплению оксидных и сульфидных плёнок, что приводит к постепенному росту переходного сопротивления и необходимости периодического шлифования острия.

3. Установлено, что палладиевый сплав Paliney 7, уступая конкурентам по объёмной проводимости и имея умеренную твердость, в условиях циклического контакта с иммерсионным оловом и серебром превосходит их по долговечности и стабильности. Ресурс на оловянных покрытиях достигает 600 тыс. циклов, что на 70 % выше, чем у W-Re, а на иммерсионном серебре разница оказывается пятикратной (450 тыс. против 80 тыс. циклов). Данный эффект объясняется формированием на поверхности острия самотормозящегося интерметаллидного слоя, который выполняет функцию твердой проводящей смазки и блокирует дальнейшее

4. Дополнительным критическим фактором, влияющим на долговечность любых игл независимо от сплава, является технология финишной заточки и качество поверхности острия. Уменьшение микрошероховатости и исключение наклёпа в зоне контакта позволяют в 1,3–1,5 раза увеличить межсервисный интервал даже для традиционных материалов.

Таким образом, предлагаемый алгоритм выбора материала должен основываться на типе финишного покрытия плат, требованиях к безостановочной работе и прецизионности измерений, а не на универсальном предпочтении одного сплава. В качестве приоритетной рекомендации для производств с широкой номенклатурой бессвинцовых покрытий выдвигается палладиевый сплав Paliney 7 как материал, обеспечивающий наилучший баланс между долговечностью, стабильностью контакта и эксплуатационными затратами в длительной перспективе.

*Список литературы:*

1. Гормаков А.Н., Воронина Н.А. Конструирование и технология электронных устройств приборов. Печатные платы. – Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 164 с.
2. Иванов, И. А. Переходное электрическое сопротивление контактов с учетом шероховатости поверхности / И. А. Иванов, И. Г. Сафонов. // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2016): материалы XII Междунар. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 3. – С. 210-214.
3. Износ и коррозия электрических контактов. // Трение и износ. – 2021. – Т. 42, № 1. – С. 23–29.
4. Данилова, Е. А. Информационно-измерительная система обнаружения дефектов печатных плат: дис.... канд. техн. наук: 05.13.06 / Е. А. Данилова; Пенз. гос. ун-т. – Пенза, 2016.
5. Редькин, А. О. Автоматизация процесса тестирования и диагностики электрических соединений в печатных платах с использованием "летающих щупов": магистерская диссертация / А. О. Редькин; ТУСУР. – Томск, 2024.
6. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977.
7. Абдуллазянов, Э. Ю. Работоспособность и надежность электрических контактов: монография / Э. Ю. Абдуллазянов, Е. И. Грачева, А. Р. Петров [и др.]; под ред.... – Казань: Отечество, 2024. – 125 с. – ISBN 978-5-9222-1804-7.
8. Мышкин, Н. К. Электрические контакты: учебно-справочное руководство / Н. К. Мышкин, В. В. Кончиц, М. Браунович. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 558 с. – ISBN 978-5-91559-003-7.

