МАТЕРІАЛИ ВИСОКОЇ ПРОВІДНОСТІ. СПЛАВИ ТА НЕМЕТАЛЕВІ ПРОВІДНИКИ

Житомир 2009

**1. Прості матеріали високої провідності та їх сплави**

До матеріалів високої провідності відносяться мідь, алюміній, натрій металевий, срібло, золото, платина, залізо. З них найбільш розповсюдженими в радіоелектронній та електротехнічній апаратурі є мідь та алюміній.

Мідь: метал жовто-червоного кольору.

Переваги міді:

Найменший, після срібла, питомий опір, ρ = 0,017 [мк Ом ּм];

достатньо висока механічна міцність;

задовільна стійкість до корозії (інтенсивне окислення відбувається тільки при підвищених температурах);

висока технологічність в обробці (з міді прокатуються листи, стрічки і протягуються дроти товщиною долів міліметра);

відносна легкість пайки та зварювання.

Отримання міді: здійснюється шляхом переробки сульфідних руд. Після декількох плавок руди та відпалювань з інтенсивним обдуванням, мідь очищують електролітичним шляхом. Отримані при цьому катодні пластини переплавляють в заготовки масою 80–90 [кг], які прокатують та протягують до необхідного поперечного перерізу. Для виготовлення дроту, спочатку шляхом гарячого прокатування, виготовляють «катанку» діаметром 6,5 ÷ 7,2 [мм], яку протравлюють в слабкому розчині сірчаної кислоти для зняття з її поверхні оксиду міді СuO, що виникає при нагріванні, а потім протягують без підігрівання в дріт потрібного діаметру до 0,03÷0,02 [мм].

Марки міді:

В якості провідникового матеріалу використовують мідь марок М1 та М0.

Склад міді:

марки М0 – 99,95% міді (Cu), 0,05% домішок, в яких кисень не повинен перевищувати 0,02%;

марки М1 – 99,9% міді (Cu), 0,1% домішок, в яких кисень не повинен перевищувати 0,08%. Присутність кисню погіршує механічні властивості міді.

При холодному протягуванні отримують тверду мідь (МТ), яка має високу межу міцності при розтягуванні, мале подовження перед розривом, твердість та пружність при вигинанні. Дріт з твердої міді здатний пружинити.

При випалюванні міді (здійснюється її підігрів до декількох сотень градусів з наступним охолодженням) отримують м’яку мідь (ММ). Відпалювання міді виконують в спеціальних печах без доступу повітря, з метою уникнення процесу окислення. М’яка мідь характеризується пластичністю, малими твердістю та міцністю, але для неї є характерним велике подовження перед розривом та більш висока питома провідність.

Сплави міді з оловом, кремнієм, фосфором, берилієм, хромом, магнієм, кадмієм – називаються бронзами. Бронзи мають більш кращі механічні властивості ніж чиста мідь. Бронзу використовують для створення пружинних контактів. Введення в мідь кадмію значно підвищує її міцність та твердість, при незначному зменшенні питомої провідності. Кадмієву бронзу використовують для виготовлення колекторних пластин. Ще більшою міцністю володіє берилієва бронза.

Сплав міді з цинком носить назву латуні, яка характеризується достатньо високим відносним подовженням при підвищеній, у порівнянні з чистою міддю, межі міцності при розтягуванні. Деталі з латуні, у порівнянні з мідними більш краще штампуються та витягуються.

Алюміній – другий за значенням після міді провідниковий матеріал. Відноситься до легких металів (питома щільність алюмінію становить 2,6 [Мг/м3], а прокатаного 2,7 [Мг/м3]). Алюміній в 3,5 рази легший ніж мідь. Температурний коефіцієнт розширення, питома теплоємність та теплота плавлення алюмінію більші ніж у міді, а температура плавлення навпаки менше. Алюміній має нижчі у порівнянні з міддю механічні та електричні характеристики. Його питомий опір ρ=0,028 [мкОм·м] в 1,63 рази більший ніж у міді ρ=0,0172 [мкОм·м]. Тому поперечний переріз дроту з алюмінію повинен бути в 1,63 рази більший, ніж у дроту з міді, для забезпечення однакового з ним електричного опору, тобто діаметр алюмінієвого дроту повинен бути в рази більший ніж у мідного. Тому якщо в конструкції існують габаритні обмеження, краще застосовувати мідний дріт. Однак при однакових довжині та електричному опорі алюмінієвий дріт в 2 рази легший за мідний. Тому для виготовлення дротів однієї і тієї ж провідності при даній довжині, алюміній буде вигідніше міді в тому випадку, якщо тонна алюмінію дорожче тонни міді не більше ніж у два рази. Алюміній менш дефіцитний за мідь.



В електротехніці використовують алюміній марки А1, що містить ≤ 5% домішок. Для виготовлення алюмінієвої фольги, електродів та корпусів оксидних конденсаторів, використовують алюміній марки АВОО кількість домішок в якому ≤ 0,03%. Алюміній марки АВОООО містить домішок ≤ 0,004%. Наявність домішок зменшує питому електричну провідність алюмінію. Прокатування, протягування та відпалювання алюмінію аналогічні операціям над міддю. З алюмінію є можливість, прокатуванням, отримати фольгу товщиною 6÷7 [мкм], яка використовується в якості електродів паперових та плівкових конденсаторів.

Алюміній активно окислюється, вкриваючись тонкою оксидною плівкою, з великим електричним опором. Ця плівка захищає алюміній від подальшої корозії, але створює великий перехідний опір в місцях контакту алюмінієвих дротів і унеможливлює пайку алюмінію звичайними методами. Для пайки алюмінію використовують спеціальні пасти – припої або ультразвукові паяльники. У місці з’єднання алюмінію та міді виникає гальванічна корозія. У разі зіткнення місця контакту з вологою, виникає місцева гальванічна пара з доволі високим значенням ЕРС, причому полярність цієї пари є такою, що на зовнішній поверхні контакту струм протікає від алюмінію до міді, в результаті чого алюміній піддається значній корозії. Тому місця з’єднання мідних провідників з алюмінієвими повинні бути якісно захищені від вологи.

Алюмінієві сплави – мають підвищену механічну міцність.

Альдрей: 0,3÷0,5% магнію (Мg), 0,4÷0,7% кремнію (Si), 0,2÷0,3% заліза (Fe), решта алюміній (Аl). Високі механічні якості альдрей отримує після особливої обробки (закалювання катанки – охолодження у воді при температурі 510÷5500С, волочіння та витримка при температурі близько 150 0С). В альдреї утворюються з’єднання Мg2Si, яке забезпечує високі механічні властивості сплаву. У вигляді дроту альдрей має:

щільність – 2,7 [Мг/м3];

межу міцності при розтягуванні – σρ = 350 [МПа];

відносне подовження перед розривом – ∆ℓ/ℓ=6,5%;

температурний коефіцієнт лінійного розширення провідника – αl=23·10–6 [K –1];

питомий опір – ρ = 0,0317 [мкОм ·м];

температурний коефіцієнт питомого опору – αρ= 0,0036 [K –1].

Альдрей є легшим за алюміній та близьким до нього за питомим опором, при цьому за механічними властивостями він більш наближений до твердотягнутої міді.

Сталеалюмінієвий дріт – широко використовується в електротехніці для побудови ліній електропередач. Це скручений стальний дріт з алюмінієвими жилами. Механічні властивості забезпечує сталь, а електричні алюміній. В цьому дроті, при високих напругах, небезпека виникнення коронного розряду є меншою ніж у мідному, завдяки меншій величині напруженості електричного поля на його поверхні, яка визначається більшим зовнішнім діаметром.

Залізо (сталь) – найбільш дешевий та доступний з високою механічною міцністю метал, однак навіть чисте залізо у порівнянні з міддю та алюмінієм характеризується великим питомим опором ρ = 0,1 [мкОм ·м]. У сталі за рахунок вуглецю опір є ще більшим. У сталі при змінному струмі проявляється поверхневий ефект, тому активний опір стальних провідників змінному струму є більшим за омічний опір постійному струму. У якості провідникового матеріалу, як правило застосовують м’яку сталь із вмістом вуглецю 0,1÷0,15%. Для неї є характерними наступні параметри:

межа міцності при розтягуванні – σρ=700÷750 [МПа];

відносне подовження перед розривом – ∆ℓ/ℓ=5÷8%;

питома провідність (γ) в 6–7 разів менша ніж у міді.

Застосування м’якої сталі є вигідним для виготовлення дротів повітряних ліній, призначених для передачі невеликих потужностей (невеликого струму), оскільки при малій силі струму, переріз дроту визначається не електричним опором, а насамперед його механічною стійкістю. Сталь, як провідник застосовується у вигляді шин, рейок трамваїв та електричних залізних доріг (у тому числі «третя рейка» метро). Для осердь сталеалюмінієвих дротів повітряних ліній електропередачі застосовується особливо міцний сталевий дріт з параметрами: σρ=1200÷1500 [МПа], ∆ℓ/ℓ=4÷5%.

Звичайна сталь є нестійкою до корозії, навіть при нормальній температурі, особливо в умовах підвищеної вологості вона швидко ржавіє. Для запобігання корозії сталь покривають цинком. Залізо характеризується високим температурним коефіцієнтом питомого ТКρ

Біметал – це сталь, зовнішня поверхня якої покрита міддю, причому обидва метали з’єднані один з одним міцно та безперервно по всій поверхні їхнього зіткнення.

Способи виготовлення біметалу:

гарячий – стальна заготовка ставиться у форму, а проміжок між заготовкою та формою заливається розплавленою міддю, після чого вже біметалічну заготівку прокатують та протягують;

холодний – мідь електролітично осаджують на сталевий дріт, пропускаючи його крізь ванну з розчином мідного купоросу.

Біметал має механічні та електричні властивості проміжні між властивостями суцільних мідного та сталевого провідників того ж перерізу. Конструкція, в якій мідь розташовується в зовнішньому шарі, а сталь всередині забезпечує:

більш високу провідність всього дроту при змінному струмові;

захист сталі від корозії.

Біметалевий дріт характеризується наступними параметрами: зовнішній діаметр від 1 до 4 [мм]; відносний склад міді не менше 50%; межа міцності при розтягуванні σρ≥550÷700 [МПа]; відносне подовження перед розривом ∆ℓ/ℓ≤2%; опір 1 [км] дроту постійному струму при 20 0С в залежності від діаметра від 60 (при 1 [мм]) до 4 [Ом/км] при 4 [мм].

Біметалевий дріт застосовується для ліній зв’язку та електропередачі, з нього виготовляються шини для розподільчих пристроїв, різноманітні струмоведучі частини електричних апаратів.

Натрій металевий – отримується шляхом електролізу розплавленого хлористого натрію NaCl. Питомий опір натрію у 2,8 рази більше ніж у міді і у 1,7 рази більше ніж у алюмінію. Завдяки дуже малій щільності (він легше води; його щільність в 9 разів менша за щільність міді) дріт з натрію значно легше за дріт з будь-якого іншого металу. Однак натрій є хімічно активним матеріалом – він інтенсивно окислюється на повітрі та бурно реагує з водою, крім того, натрій є дуже м’яким матеріалом та має малу межу міцності при розтягуванні та інших деформаціях. Тому дріт з натрію повинен бути захищеним герметичною оболонкою, яка повинна також надавати дроту необхідні механічну міцність та електричну ізоляцію. Натрієві дроти та кабелі виготовляють в пластмасових (поліетиленових) оболонках.

**2. Надпровідники та кріопровідники**

В 1911 р. нідерландський фізик Х. Камерлінг – Оннес, при дослідженні електропровідності металів при «гелієвих» температурах (температура переходу гелію в рідкий стан, при нормальному тиску, 4,2 [К]) зробив відкриття, що опір кільця з замороженої ртуті, стрибком зменшується до мізерного значення, яке дуже важко виміряти. Таке явище отримало назву надпровідності.

Температура, при охолодженні до якої, речовина переходить в надпровідний стан, називається температурою надпровідного переходу ТН. Речовини, які здатні переходити в надпровідний стан, називаються – надпровідниками. Явище надпровідності носить зворотній характер, а саме при підвищенні температури надпровідність зникає і речовина переходить в нормальний стан з кінцевим значенням питомої провідності γ. Відомо 35 надпровідникових металів та більше тисячі сплавів та хімічних з’єднань різноманітних елементів. Явище надпровідності пов’язане з тим, що електричний струм одного разу наведений в надпровідному контурі, буде тривалий час (роками) циркулювати по цьому контуру без будь-якого підведення енергії ззовні (без урахування витрат енергії на роботу пристрою охолодження, який має підтримувати температуру контуру нижче значення ТН, характерного для даного надпровідного матеріалу). Такий надпровідний контур створює в просторі магнітне поле, подібне постійному магніту. Однак на практиці виготовити працюючий надпровідниковий електромагніт, який здатний створити в просторі магнітне поле з достатньо великими значеннями напруженості магнітного поля Н та магнітної індукції В виявилося проблематично. З’ясувалося, що надпровідність порушується не тільки при підвищенні температури до значень, що перевищують ТН але і при виникненні на поверхні надпровідника магнітного поля з магнітною індукцією, що перевищує індукцію переходу ВН. Кожному значенню температури ТН матеріалу, який знаходиться у стані надпровідності, відповідає відповідне значення індукції переходу ВН. Найбільша можлива температура переходу ТН0 (критична температура) даного надпровідникового матеріалу відповідає критичній магнітній індукції ВН0 і навпаки.

***Т,[ К]***

**Нормальний стан**

***ТН0***

**0**

***[Тл]***

***В,***

**Стан надпровідності**

***ВН0***

Параметри надпровідникових матеріалів

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Надпровідник | ТН0, [К] | ВН0, [Тл] |
| Елементарні І роду: | | |
| Ірідій Ir | 0,14 | 0,002 |
| Алюміній Al | 1,2 | 0,01 |
| Олово Sn | 3,7 | 0,031 |
| Ртуть Hg | 4,2 | 0,046 |
| Тантал Та | 4,5 | 0,083 |
| Cвинець Pb | 7,2 | 0,08 |
| Елементарні ІІ роду: | | |
| Ніобій Nb | 9,4 | 0,195 |
| Ванадій V | 5,3 | 0,13 |
| Складні сплави ІІ роду: | | |
| 50% Nb +50% Ті | 8,7 | 12 |
| 50% Nb +50% Zr | 9,5 | 11 |
| З’єднання ІІ роду: | | |
| Галід ванадію V3Ga | 14 | 50 |
| Станнід ніобію Nb3Sn | 18 | 22 |

В 1933 році німецькі фізики В. Майснер та Р. Оксенфельд зробили нове фундаментальне відкриття: надпровідники при переході з нормального в надпровідний стан стають ідеальними діамагнетиками, тобто їх відносна магнітна проникність стрибком зменшується від кінцевих значень (для більшості надпровідників приблизно дорівнює 1) до µr=0. Тому зовнішнє магнітне поле не може проникнути в надпровідниковий матеріал – надпровідники здатні відштовхувати його.

***В***

Розрізняють напівпровідники:

І роду – перехід у стан надпровідності, при охолодженні, відбувається стрибком;

ІІ роду – перехід у стан надпровідності при охолодженні, відбувається поступово; також у них існує проміжній стан між нижнім ВНниж. та верхнім ВНверх. значеннями критичної магнітної індукції переходу, що відповідають значенням температур Т< ТН0.

У порівнянні з надпровідниками І роду надпровідники ІІ роду мають більш високі значення, як критичної температури переходу ТН0 так і критичної магнітної індукції ВН0. Останній фактор є визначальним для широкого застосування надпровідників в сучасних електричних апаратах.

***Т,[ К]***

**Нормальний стан**

***ТН0***

**0**

***[Тл]***

***В,***

**Область проміжного стану**

***ВНверх.***

***ВНниж.***

**Стан надпровідності**

***3***

***1***

***2***

Перспективним напрямком, є пошук так званих «теплих» надпровідників, з більш високою температурою переходу у стан надпровідності ТН, що зменшить складність та вартість апаратури охолодження.

Кріопровідники («кріос» – з грецького холод).

Крім явища надпровідності в сучасній електротехніці все ширше використовується явище кріопровідності, тобто поступове (без стрибків) досягнення металами малого питомого опору, при кріогенних температурах, без переходу їх в надпровідний стан. Такі метали називаються кріопровідниками. Питомий опір кріопровідника при робочій температурі може бути меншим за питомий опір цього ж провідника при нормальній температурі в сотні, а в деяких випадках і в тисячі разів.

Кріопровідність це – особливий випадок нормальної електропровідності металів при кріогенних температурах. Найчастіше, в якості кріопровідників використовуються: алюміній при температурі рідинного водню та берилій при температурі рідинного азоту. Застосування кріопровідників замість надпровідників приводить до спрощення та зменшення вартості виконання теплової ізоляції пристроїв, зниження витрат потужності на їх охолодження. Крім того, в надпровідному контурі з великим струмом накопичується значна кількість енергії магнітного поля (W=L·I2/2, де L – індуктивність, [Гн]; I – сила струму, [А]). При випадковому підвищенні температури або магнітної індукції вище значень, що відповідають переходу надпровідника в нормальний стан хоча б в малій частині надпровідного контуру, надпровідність буде порушена, що приведе до швидкого вивільнення великої кількості енергії. Для кріопровідника такої небезпеки не існує, оскільки підвищення температури може вплинути тільки на поступове, плавне збільшення його опору. Для отримання високоякісних кріопровідників необхідні виключно висока чистота металу (відсутність домішок) та відсутність наклепу (виникає при відпалюванні).

**3. Сплави високого опору та спеціальні сплави. Контактні матеріали. Неметалеві провідники**

# Сплави високого опору мають при нормальній температурі питомий опір ρ ≥ 0,3 [мкОм· м]

При використанні сплавів високого опору:

у вимірювальних приладах та в якості зразкових резисторів, вони повинні мати:

високий питомий опір;

високу стабільність питомого опору в часі;

малий температурний коефіцієнт питомого опору αρ;

малий коефіцієнт термо – е.р.с. у парі з міддю.

в електронагрівальних елементах:

повинні бути здатними працювати тривалий час у повітряному середовищі при високих температурах до 1000 0С.

Бажано, щоб сплави, які використовуються для приладів, що виготовляються у великих кількостях були дешевими і не містили дефіцитних компонентів.

Манганін – найбільш широко використовується для виготовлення зразкових резисторів. Склад: мідь (Cu) – 85%; марганець (Mn) – 12%; нікель (Ni) – 3%.

Назва походить від латинської назви марганцю – «manganum». Сплав має жовтуватий колір завдяки вмісту великої кількості міді.

Параметри манганіну:

питомий опір ρ=0,42÷0,48 [мкОм·м];

температурний коефіцієнт питомого опору αρ=(5÷30)·10–6[К-1];

коефіцієнт термо-е.р.с. у парі з міддю складає 1÷2 [мкВ/K];

максимальна робоча температура, при якій тривалий час він може експлуатуватися ≤ 200 0С;

щільність 8,4 [Мг/м3];

межа міцності при розтягуванні σρ=450÷600 [МПа];

відносне подовження перед розривом ∆ℓ/ℓ=15÷30%.

Манганін може витягуватися в тонкий дріт (діаметром до 0,02 [мм]). Для забезпечення малого температурного коефіцієнта питомого опору αρ та стабільного в часі питомого опору ρ – манганіновий дріт проходить термічну обробку, шляхом її випалювання у вакуумі при температурі 550÷600 0С з наступним повільним охолодженням. Намотані котушки іноді додатково відпалюються при температурі 2000С.

Константан – сплав в склад якого входять: мідь (Cu) – 60%; нікель (Ni) – 40%. Назва «константан» пояснюється значною стабільністю його питомого опору при зміні температури. Стійкість до нагрівання у константану є вищою ніж у манганіну, тому перший може застосовуватися для виготовлення реостатів, електронагрівальних елементів та термопар для вимірювання температури в межах декілька сотень градусів.

Параметри константану:

питомий опір ρ=0,48÷0,52 [мкОм·м];

температурний коефіцієнт питомого опору αρ=(5÷25)·10–6[К-1];

коефіцієнт термо-е.р.с. у парі з міддю складає 45÷55 [мкВ/K], що обмежує його застосування у вимірювальних схемах;

максимальна робоча температура, при якій тривалий час він може експлуатуватися 450 0С;

щільність 8,9 [Мг/м3];

межа міцності при розтягуванні σρ=400÷500 [МПа];

відносне подовження перед розривом ∆ℓ/ℓ=20÷40%.

Широке застосування константану обмежує наявність в його складі дорогого та дефіцитного нікелю.

Сплави на основі заліза – застосовуються в основному для електронагрівальних елементів. Сплави системи Fe-Ni-Cr – називаються ніхромами, при підвищеному вмісті Fe – фероніхромами. Сплави системи Fe-Cr-Al – називаються фехралями та хромалями. Для характеристики сплавів застосовуються умовні позначення, що складаються з букв та чисел. Букви позначають найбільш характерні елементи, що містяться в сплаві, причому вони можуть бути не першими у назві елемента (Б – ніобій, В-вольфрам, Г – марганець, Д – мідь, К – кобальт, Л – берилій, Н – нікель, Т – титан, Х – хром, Ю – алюміній), а число приблизний вміст даного компонента в сплаві.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка сплаву | Склад сплаву, % | | | | | Щільність,  Мг/м3 | ρ, мкОм·м | αρ·10-6, K-1 | tМАКС, 0С | σР,МПа | ∆ℓ/ℓ, % |
| Cr | Ni | Mn | | Аl |
| Х15Н60 | 15÷18 | 55÷61 | 1,5 | | - | 8,2÷8,3 | 1,1÷1,2 | 100÷200 | 1000 | - | - |
| Х20Н80 | 20÷23 | 75÷78 | 1,5 | - | | 8,4÷8,5 | 1,0÷1,1 | 100÷200 | 1100 | - | - |
| Параметри хромалюмінієвих сплавів | | | | | | | | | | | |
| Х13Ю4 | 12÷15 | 0,6 | 0,7 | 3,5÷5,5 | | 7,1÷7,5 | 1,2÷1,35 | 100÷120 | 900 | 700 | 20 |
| Х23Ю5 | 22÷25 | 0,6 | 0,7 | 4,5÷5,5 | | 6,9÷7,3 | 1,3÷1,5 | 65 | 1200 | 800 | 10÷15 |

Решта% в складі сплавів містить залізо (Fe)

Великий вплив на термін експлуатації нагрівального елемента, що працює в повітряному середовищі, мають властивості оксиду, що утворюється на поверхні сплаву. Чим менше оксид улітучується з поверхні металу, тим він краще захищає метал від подальшого окислення в умовах високих температур.

Спеціальні сплави

Сплави для термопар

Для виготовлення термопар використовують наступні сплави:

копель: 56% Cu + 44% Ni;

алюмель: 95% Ni + Al, Si, Mg;

хромель: 90% Ni + 10% Cr;

платинородій: 90 Pt + 10 Rh (радій).

Термопари можуть використовуватися для вимірювання наступних температур:

платинородій – платина – до 1600 0С;

хромель – алюмель – до 900÷1000 0С

хромель – копель, залізо – копель, залізо – константан – 600 0С;

мідь – константан, мідь – копель – до 350 0С.

Найбільшу термо – е.р.с при заданій різниці температур розвиває термопара хромель – копель. В холодному спаї струм протікає від першого названого в парі матеріалу до другого, в гарячому спаї навпаки.

Тензометричні сплави – використовуються в перетворювачах деформації різноманітних конструкцій під дією механічних зусиль (як правило розтягування). Принцип дії заснований на зміні опору при деформаціях тензометричного елемента. Коефіцієнт тензочутливості визначається за формулою.

,



де Δ R – зміна опору R при зміні Δl довжини елемента l. Значення d може бути розраховано за формулою:

,



де Δρ зміна питомого опору ρ матеріалу тензоперетворювача, під впливом механічного навантаження F, S – площа поперечного перерізу дроту перетворювача, Е – модуль Юнга, μ – коефіцієнт Пуасона матеріалу дроту. Основним матеріалом для тензометричних перетворювачів є константан.

Контактні матеріали

Матеріали для розривних контактів, що використовуються для розмикання електричних кіл при значних струмах та напругах, повинні забезпечити високу надійність, при малому перехідному електричному опорі контакту в замкнутому стані (унеможливлення обгоряння контактуючих поверхонь, а також приварювання їх один до одного під дією електричної дуги, що виникає при розмиканні контакту).

В якості контактних матеріалів найбільш поширений матеріал системи Ag – CdO при вмісті оксиду кадмію 12÷20%. Такий матеріал отримується при нагріванні в окислювальній атмосфері сплаву срібло – кадмій. Для розривних контактів в установках великої потужності застосовуються композиції: сріла Ag з кобальтом Со, нікелем Ni, хромом Cr, вольфрамом W, молібденом Mo та танталом Ta; міді Сu з вольфрамом W та молібденом Mo; золота Au з вольфрамом W та молібденом Mo. Матеріали для рухомих контактів повинні мати високу стійкість до стирання. Цим вимогам відповідають тверда мідь, берилієва бронза, а також матеріали системи Ag – CdO.

Припої – це спеціальні сплави, які використовують при пайці. Пайка – це створення механічно міцного шва з малим перехідним опором. При пайці місце з’єднання та припою нагрівається. Температура плавлення припою є значно меншою за температуру плавлення металів, які паяються.

Розрізняють припої двох груп: м’які та тверді.

До м’яких відносяться припої з температурою плавлення до 400 0С до твердих більше 500 0С. М’які припої мають межу міцності при розтягуванні σρ=50÷70 [МПа], а тверді до 500 [МПа], м’які припої в основному є олов’яно – свинцеві (марка ПОС) з вмістом олова від 18% (ПОС – 18) до 90% (ПОС – 90). Питома провідність цих припоїв становить 9÷13% питомої провідності стандартної міді, а температурний коефіцієнт лінійного розширення αℓ = 26·10-6 [К –1]. Існують також м'які припої з добавками алюмінію та срібла. Там де необхідна понижена температура плавлення застосовують легкоплавкі припої, в склад яких входять вісмут та кадмій, але їх механічна міцність є дуже незначною.

Найбільш поширеними твердими припоями є мідно – цинкові від ПМЦ-36 (Сu 36%, Zn 64%) до ПМЦ-54 (Сu 54%, Zn 46%) та срібні від ПСр-25 (Ag 25%, Zn 35%, Cu 40%) до ПСр-70 (Ag 70%, Zn 4%, Cu 26%).

Флюси – це допоміжні матеріали для отримання надійної пайки, вони повинні:

розчиняти оксиди з поверхні металів, які паяються;

захищати поверхню металу та розплавлений припой від окислення;

зменшувати поверхневе натягування розплавленого припою та змочування ним поверхонь, що приєднуються.

За дією, яку спричиняють на метал, що паяється флюси, вони поділяються на:

1) Активні або кислотні флюси – виготовляються на основі активних речовин: соляної кислоти, хлористих та фтористих з’єднань металів, тощо. Ці флюси здатні інтенсивно розчиняти оксидні плівки на поверхні металу, завдяки чому забезпечується добра адгезія, а відповідно і висока механічна міцність спаювання. Оскільки залишки флюсу здатні викликати корозію, як основного металу так і місця спаювання, такі флюси можна застосовувати, якщо є можливість промивки місця спаювання та повного видалення залишків флюсу.

2) Безкислотні флюси – так називають каніфоль і флюси на його основі з додаванням неактивних речовин (спирту та гліцерину).

3) Активовані флюси – це флюси на основі каніфолі з добавкою активаторів – невеликої кількості солянокислого або фосфорнокислого аніліну, саліцилової кислоти, солянокислого діетиламіну. Висока активність деяких активованих флюсів дозволяє виконувати спаювання без попереднього видалення оксидів після обезжирювання.

1. Антикорозійні флюси – це флюси на основі

фосфорної кислоти з добавками різних органічних сполук і розчинників, а також флюси на основі органічних кислот. Залишки таких флюсів не викликають корозії.

З числа твердих неметалевих провідників найбільше значення мають матеріали на основі – вуглецю (електровугільні). З вугілля виготовляють контакти для електричних машин та генераторів, електроди для прожекторів, електроди для дугових електричних печей, високоомні резистори, розрядники для телефонних мереж. В якості сировини для електровугільних виробів використовують сажу, графіт або антрацит.

Вугільні електроди, які працюватимуть при високих температурах обробляються при температурі 3000 0С. Вугільні електроди, як і інші вугільні вироби мають негативний температурний коефіцієнт питомого опору.

Щітки призначені для утворення рухомого контакту між нерухомою частиною електричної машини та частиною, що обертається та підведення (відведення) струму до колектора або контактних кілець. Розрізняють щітки вугільно-графітні (УГ), графітні (Г), електрографітовані (ЕГ), щітки з домішками міді (М та МГ). Ці щітки мають малий питомий опір.

Вугільний порошок для мікрофонів виготовляють з антрациту. Питомий опір порошку залежить від розмірів зерен, режиму обпалювання та щільності завантаження. Мікрофонні порошки бувають двох типів: дрібнозернисті, (проходять крізь сито з 52 отворами на 1 [см2]) та крупнозернисті (проходять крізь сито з 45 отворами на 1 [см2]). Обпалювання порошків, яке приводить до зростання їх електричного опору здійснюють при температурі 6000С. Порошки не повинні спресовуватися на протязі певного часу та злипатися під дією підвищеної вологості.

Недротяні резистори, які відрізняються від дротяних меншими габаритами та високою верхньою межею номінального опору виготовляють з природного графіту, сажі, піролітичного вуглецю, боровуглецевої плівки, а також з високоомних сплавів металів, тощо.

Природний графіт – одна з модифікацій чистого вуглецю з великою анізотропією, як електричних так і механічних властивостей.

Піролітичний вуглець отримують шляхом піролізу (термічного розкладання без доступу кисню) газоподібних вуглеводнів (металу, бензину, гептану) в камері де знаходяться керамічні або скляні основи заготівок резисторів.

Боровуглецеві плівки – можуть бути отримані піролізом борорганічних з’єднань В(С3Н7)3 або В(C4H9)3. Ці плівки характеризуються малим температурним коефіцієнтом питомого опору. Використовуються для виготовлення резисторів МЛТ.

**4. Характеристика інших металів**

Вольфрам – надзвичайно важкий та твердий метал сірого кольору. З усіх металів має найбільшу температуру плавлення. Його отримують з руд різного складу; проміжним продуктом є вольфрамова кислота H2WO4, з якої відновленням воднем при нагріванні до 9000С отримують металевий вольфрам у вигляді порошку. З цього порошку при високому тиску пресують стрижні, які обробляють при високій температурі в атмосфері водню (для запобігання окисленню), після чого перетворюють процесами кування та волочіння в дріт діаметром до 0,01 [мм] або прокатуванням в листи.

Для вольфраму є характерним слабкий зв’язок між окремими кристалами, тому при зернистій структурі вироби з нього є досить крихкими та легко ламаються. Після кування та волочіння вольфрам стає волокнистим, гнучким та міцним, його межа міцності при розтягуванні σρ приймає значення приблизно від 500÷600 [МПа] для стрижнів діаметром 5 [мм] до 3000÷4000 [МПа] для тонких ниток, причому відносне подовження перед розривом ∆ℓ/ℓ для ниток становить менше 2%. Нитки вольфраму знайшли широке застосування у якості елементів розжарювання в електронно-вакуумних приладах, завдяки здатності вольфраму витримувати температури більше 20000С. При цьому застосування вольфраму можливе тільки в умовах високого вакууму або в атмосфері інертних газів тому, що в повітрі він сильно окислюється. Вольфрам застосовують також для виготовлення контактів.

До переваг вольфрамових контактів можна віднести:

cтійкість у роботі;

незначне механічне зношування;

здатність протистояти дії електричної дуги та не приварюватися один до одного;

низька схильність до ерозії (утворення кратерів та наростів в місцях перегріву та плавлення металу).

Для контактів з великими значеннями потужності, що комутується, використовують металокерамічні матеріали. Заготовку пресують з порошку вольфраму під великим тиском, спікають в атмосфері водню, отримуючи міцну, але пористу основу, яку пропитують розплавленим сріблом або міддю для збільшення провідності.

До недоліків вольфраму можна віднести:

складність обробки;

утворення в атмосферних умовах оксидних плівок;

необхідність у великих тисках для забезпечення малих значень електричного опору контакту.

Молібден – широко використовується в електровакуумній техніці, але при менших температурах ніж вольфрам. Може експлуатуватися тільки в вакуумі або інертному газі. Механічна міцність молібдену в дуже великій степені залежить від механічної обробки матеріалу, виду виробу, діаметру стрижнів або дроту та наступної термообробки. Його межа міцності при розтягуванні σр може приймати значення від 350 до 2500 [МПа], а відносне подовження перед розривом ∆ℓ/ℓ становить від 2% до 55%. Щільність молібдену приблизно вдвічі менша ніж у вольфраму.

Застосування молібдену:

в електровакуумній техніці. Найбільш розповсюдженими є марки МЧ (молібден чистий) та МК (молібден з кремнієм). Остання марка має високу механічну міцність при високих температурах;

в якості матеріалу для контактів.

Благородні метали

Золото – метал жовтого кольору, який має високу пластичність.

Параметри: межа міцності при розтягуванні σρ=150 [МПа]; відносне подовження перед розривом ∆ℓ/ℓ=40%.

Застосовується в якості: контактного матеріалу для корозійно – стійкого покриття, електродів фотоелементів, вакуумного напилення плівкових мікросхем, тощо.

Срібло – білий блискучий метал, стійкий до окислення при нормальній температурі. Має найменший питомий опір з усіх металів – ρ= 0,016 [мкОм·м].

Параметри срібного дроту: межа міцності при розтягуванні σρ=200 [МПа]; відносне подовження перед розривом ∆ℓ/ℓ=50%.

Застосовується в якості: контактного матеріалу, обкладинок керамічних та слюдяних конденсаторів (срібло наноситься безпосередньо на матеріал діелектрика).

Недоліками срібла є:

схильність до міграції по поверхні та всередину діелектрика, на який його наносять, при високих вологості та температурі;

але найгіршу хімічну стійкість у порівнянні з іншими благородними металами.

Платина – хімічно стійкий метал, який практично не з’єднується з киснем. Добре піддається механічній обробці, здатний витягуватися в тонкі нитки або стрічки. Параметри: межа міцності при розтягуванні σρ = 150 [МПа], відносне подовження перед розривом ∆ℓ/ℓ=30÷35%. Застосовується для виготовлення термопар для вимірюванні температур до 16000С. Внаслідок низької твердості платина не використовується самостійно, але служить основою для контактних сплавів. Так сплави платини з іридієм стійкі до окислення та зносу, мають високу твердість і допускають велику частоту включень, однак характеризуються високою вартістю, що обмежує їх широке застосування.

Паладій – метал за багатьма властивостями близький до платини, іноді служить її замінником. Параметри: межа міцності при розтягуванні σρ = 200 [МПа], відносне подовження перед розривом ∆ℓ/ℓ=40%. Застосовується в електровакуумній техніці для поглинання водню; сплави паладія зі сріблом використовуються для виготовлення контактів.

Нікель – сріблясто – білий метал, що широко використовується в електровакуумній техніці. Його достатньо легко можна отримати в дуже чистому вигляді (99,99% Ni). Параметри: межа міцності при розтягуванні σρ=400÷600 [МПа], відносне подовження перед розривом ∆ℓ/ℓ=35÷50%. Гарно обробляється навіть в холодному вигляді (кується, пресується, прокатується, штампується), є стійким до окислення. Використовується для захисту виробів з заліза.

Кобальт – отримують металургійним шляхом з подальшим очищенням та відновленням оксидів кобальту воднем. Параметри: межа міцності при розтягуванні σρ=500 [МПа], відносне подовження перед розривом ∆ℓ/ℓ більше 50%. Хімічно не активний. Використовується в якості складової магнітних та жаростійких сплавів, а також сплавів з малими температурними коефіцієнтами лінійного розширення.

Цинк – світло-сірий метал. Отримують металургійним шляхом з подальшою електролітичною очисткою. Цинк марки ЦВ (високоочищений) має 99,99% Zn та 0,01% домішок. При нормальній температурі крихкий. При нагріванні до 1000С стає пластичним та тягучим, а при подальшому підвищенні температури до 2000С – знов крихким. Використовується в якості захисного покриття, для виготовлення фотоелементів, електродів гальванічних елементів, для металізації паперу в малогабаритних метало-паперових конденсаторах.

Ртуть – єдиний метал, який при нормальній температурі знаходиться в рідинному стані. Її добувають з кіновари HgS шляхом термічного розкладання при температурі 5000С, після чого піддають багатократному очищенню, яке закінчується вакуумною перегонкою при температурі 2000С. Ртуть легко випаровується та має значний тиск парів при кімнатній температурі. Пари ртуті відрізняються більш низькою напругою іонізації, у порівнянні з іншими звичайними та інертними газами, що обумовлює застосування ртуті в газорозрядних приладах. Ртуть окислюється на повітрі тільки при температурах, близьких до температури її кипіння. Магній, алюміній, цинк, олово, свинець, кадмій, платина, золото та срібло розчиняються в ртуті, створюючи амальгами. Слабо розчиняються в ртуті мідь та нікель. Зовсім не розчиняються в ртуті вольфрам, залізо або тантал. Ртуть застосовується в якості рідинного катоду в ртутних випрямлячах, ртутних лампах та газорозрядних приладах, лампах денного світла, а також в якості ртутних контактів в реле тощо. Ртуть її з’єднання та пари є дуже шкідливими для організму людини.