

Ю.С. ГРИЩУК, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПІ"
Л.В. КУРИЛО, магістр, НТУ "ХПІ"

ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ПЛАВКИХ ВСТАВОК ЗАПОБІЖНИКІВ

Викладено результати дослідження характеристик матеріалів, що застосовуються при виготовленні плавких вставок запобіжників і сплавів на основі міді та проведено їх порівняльний аналіз.

Ключові слова: швидкодіючий запобіжник, плавкий елемент, матеріали, сплав мідь-алюміній.

Вступ. Плавкі запобіжники широко використовуються для захисту електроустановок, електричних мереж від струмів коротких замикань, забезпечуючи, за певних умов, ефект струмообмеження. При їх використанні не потрібно встановлювати трансформатори струму і напруги, реле і автоматичні вимикачі, необхідні при здійсненні релейного захисту. Тому дослідження матеріалів плавких елементів з метою покращення техніко-економічних характеристик запобіжників є досить актуальною темою.

Метою роботи є проведення огляду та аналізу матеріалів, використовуваних для плавких вставок запобіжників, і сплавів на основі міді, для виявлення можливості їх застосування з метою поліпшення захисних і техніко-економічних характеристик запобіжників.

Для вирішення поставленого завдання розглянуті та проаналізовані ряд існуючих застосовуваних матеріалів плавких вставок та сплавів на основі міді і їх характеристики [1-6].

В даний час для виготовлення плавких елементів швидкодіючих запобіжників (ШЗ) застосовується, в основному, срібло. У зв'язку з дефіцитом срібла і його високою вартістю, останні десятиліття в багатьох країнах і по різних напрямках проводяться роботи по його заміні, проте, радикальне рішення доки не знайдене. Жодне з відомих напрямів не привело до повного виключення срібла з конструкції плавкого елемента при збереженні необхідних характеристик запобіжників. Введення в мідь алюмінію у кількості, достатній для створення його оксиду на поверхні, повинно зменшити швидкість окислення сплаву більш ніж у 8000 разів. Але, при використанні стандартної технології отримання сплаву, уповільнення окислення відбувається лише у 36 разів. При застосуванні спеціальної технології сплав на основі

Cu – 95 %, Al – 5 % повинен забезпечити захист від окислення у повітрі при температурі до 800 °С, що забезпечує високу циклічну стійкість запобіжників та надійність при відключенні малих аварійних струмів. Вплив механічних напружень і ефекту старіння в плавких вставках з цього сплаву зведено до мінімуму, а спрацьовування запобіжника відбувається тільки при досягненні струму плавлення.

Відомі сполучення срібних та мідних ділянок плавкої вставки. Існує напрямок по створенню сплавів на основі срібла Ag-8 %, Sn, Ag-Ni. До теперішнього часу жодне з відомих авторам направлень не призвело до повного виключення срібла з конструкції плавкої вставки при збереженні необхідних захисних характеристик запобіжників. Тому доцільно розглянути основні фізичні властивості алюмінію та міді, які близькі до срібла.

Характеристики срібла. Срібло має високу і стабільну електричну провідність. Срібні плавкі елементи добре працюють в безперервному, при циклічних навантаженнях і перевантаженнях, на повітрі і в піщаному наповнювачі. Після закінчень цих дій електричний опір срібного плавкого елемента повертається до початкового значення.

Плавкі елементи з срібла мають максимальний в порівнянні зі всіма іншими матеріалами, що використовуються, термін служби. Фізичні властивості срібла позитивно впливають на захисні характеристики запобіжників, – низькі значення питомої теплоємності, питомої теплоти плавлення і випаровування, високий потенціал іонізації [2].

Слабка хімічна активність срібла характеризується малою енергією утворення його з'єднань з киснем, сіркою, вуглецем, рівною 31 кДж/моль. При дії високих температур срібло може окислюватися, але оксиди срібла нестійкі, і при температурі вище 180 °С вони відновлюються до чистого срібла. Срібло має хороші технологічні властивості: легко піддається точному штампуванню, зварюванню і паянню, не вимагає при цьому попередньої обробки.

Характеристики алюмінію. У зв'язку з тим, що у всьому світі запаси міді і срібла швидко виснажуються, і вже в даний час відчувається недолік цих матеріалів, в найближчому, ймовірно, як матеріал плавких елементів набуде великого поширення третій високопровідний матеріал – алюміній [4-6]. Найголовнішими його перевагами є низька вартість і великі запаси в земній корі.

Питомий електричний опір алюмінію на 70 % вищий, ніж в срібла. Електричний опір алюмінієвих плавких елементів стабільний при тривалому протіканні номінального струму, що обумовлений наявністю тонкої окисної плівки, що захищає метал від подальшого окислення. Окисна плівка має хорошу адгезію з алюмінієм і не руйнується при

нагріві аж до температури плавлення. Але саме наявність окисної плівки утрудняє процеси паяння і зварки алюмінієвих плавких елементів. Значні успіхи, досягнуті останнім часом в цій області, безумовно, будуть сприяти швидкому впровадженню алюмінію у виробництво плавких запобіжників [4, 6]. Поширена, деякий час тому, думка про те, що із-за окисної плівки струм короткого замикання плавким елементом з алюмінію не уривається, при досягненні температури кипіння алюмінію, не підтвердилася. Дослідження показали, що при відключенні струмів короткого замикання вплив окисної плівки неістотний. І лише при струмах перенавантаження, близьких до пограничного, спостерігається тривале протікання струму по рідкому алюмінію. Екзотермічна реакція, що розвивається в запобіжнику при його спрацьовуванні, може привести до виділення додаткової енергії. Алюміній відрізняється виключно високими значеннями енергії утворення з'єднань з киснем, сіркою і вуглецем, рівним 1673 кДж/моль. Аналогічні значення для срібла і міді рівні відповідно 31 і 168 кДж/моль. Огляд літератури з даного питання показав, що є мало даних по впливу матеріалу плавкого елемента на захисні характеристики швидкодіючих плавких запобіжників. Зважаючи на те, що в стовпі дуги створюється вельми високий тиск, основна частина металу широкої частини плавкого елемента, що розплавився, розбризкується в навколишній дугогасний наповнювач, а менша частина його (не більше 10 %) випаровується. Тому відношення парів металу плавкого елемента до кремнію складає 1:80 в кварцовому піску. Таким чином, дуга горить практично в парах наповнювача, а значить, незалежно від матеріалу плавкого елемента. Розрахункове значення тиску дуги знаходилося в межах 6-10 Па і визначалося, в основному, парами наповнювача.

Характеристики міді. Найбільш близьким до срібла фізичними властивостями володіє мідь, і завдяки цьому вона широко використовується у виробництві плавких запобіжників загальнопромислового використання. Мідь вважають одним з найперспективніших матеріалів для заміни срібла в плавких елементах швидкодіючих запобіжників. В даний час щорічний світовий видобуток міді перевищує 10 млн. т., тобто на три порядки вище за видобуток срібла. Мідь дешевша за срібло, щонайменше, в 300 разів і близька до нього по своїх електрофізичних властивостях. Питомий електричний опір міді всього лише на 5-6 % вище, ніж в срібла, температурні коефіцієнти міді і срібла досить близькі. Теплопровідність міді приблизно на 6 % менша, ніж в срібла, а температура плавлення більш ніж на 120 °С вище [2]. Проте мідь інтенсивно окислюється, а її окисел стабільний аж до температури

ри плавлення міді. Завдяки своїй стабільності плівка могла б бути захисною, коли б не механічна напруга, що виникає при зміні температури і перешкоджаючі адгезії плівки до чистого металу. Унаслідок дії цих сил окисна плівка міді розтріскується і відшаровується, полегшуючи тим самим подальший розвиток корозійних процесів. Термін служби плавких елементів з міді набагато коротший за термін служби плавких елементів з срібла. Особливо чутливі плавкі елементи з міді до циклічних навантажень.

Сумарна тривалість протікання струму до розплавлення плавкого елемента з міді при циклічному навантаженні набагато менше тривалості протікання струму через той же плавкий елемент в безперервному режимі. Розміщення плавкого елемента з міді в кварцовому піску декілька змінює картину його поведінки. Хоча при навантаженні термін служби плавкого елемента з міді в піщаному наповнювачі майже такий же, як і термін служби на повітрі, але унаслідок більш рівномірного розподілу температури уздовж плавкого елемента циклічні перевантаження надають не настільки руйнівну дію, як на повітрі. На жаль, гальванічне сріблення не дозволяє надійно захистити мідний плавкий елемент від окислення. Використання мідних плавких елементів можливе за умови забезпечення надійного захисту їх поверхні від дії доквілля, збереження цілісності окисної плівки і оптимального вибору номінального режиму запобіжника. Надійний захист поверхні мідного плавкого елемента від дій середовища, зокрема від окислення, може бути досягнутий шляхом нанесення покриття, наприклад, з нікелю або металу, що має міцну окисну плівку, наприклад, алюмінію. Ефективним є використання так званого твердого наповнювача, сформованого за допомогою просочення кварцового піску рідкою зв'язуючою речовиною з подальшим просушуванням. Тверда структура, що утворилася при цьому, забезпечує надійний захист поверхні плавкого елемента.

Мідь не є хімічно активним елементом, а швидкість її корозії при нормальній температурі мала. Антикорозійні властивості міді визначаються міцністю захисної окисної плівки, що сповільнює подальше руйнування металу при впливі корозії. При хімічній реакції $2\text{Cu} + \text{O}_2 = \text{Cu}_2\text{O}$. При цьому виділяється енергія 168 кДж/моль, що значно менше ніж для алюмінію, але більше ніж для срібла. Маса плавких вставок запобіжників ПЗ-57, ПЗ-59, ПЗ-60 складає 10-30 г і містить не більше (1-2) % кисню, необхідного для окиснення плавкої вставки. Циклічна стійкість міді на порядок вище у вакуумі ніж у повітрі. Окисні плівки міді мають достатню електропровідність і не впливають на роботу плавкої вставки. Мідь та срібло мають ідентичну структуру та утво-

рюють евтектики з оловом, що мають практично однакові температури плавлення (200-300) °С близькі до точки плавлення олова. Мідні плавкі вставки досліджувались за умови забезпечення надійного захисту їх поверхні від впливу оточуючого середовища, збереження цілісності оксидної плівки та оптимального вибору номінального режиму запобіжника. Надійний захист поверхні мідної плавкої вставки досягається шляхом нанесення покриття, наприклад, з нікелю, або алюмінію. Ефективне використання так званого твердого наповнювача, сформованого шляхом просочення кварцового піску рідкою речовиною, що зв'язує, з наступним просушуванням. Утворена при цьому тверда структура забезпечує надійний захист поверхні вставки. Для збереження цілісності оксидної плівки мідної вставки ефективним є використання вигнутих плавких вставок.

Сплави на основі міді.

Корозійна стійкість. Присадки алюмінію до міді підвищують корозійну стійкість міді в багатьох середовищах. Так за даними А.Е. Гопіуса, змінення ваги в результаті корозії різних мідно-алюмінієвих сплавів у залежності від вмісту в них алюмінію та умов випробування за весь період випробування (термін випробування – три місяці) наведено в табл. 1 [2].

Таблиця 1 – Змінення ваги мідно-алюмінієвих сплавів в результаті корозії (термін випробувань – 3 місяці).

Вміст алюмінію, %	Змінення ваги в г/м ² при випробуваннях		
	У теплій воді (60 °С) воді	у морській воді із змінним зануренням	
		без висушування	з висушуванням
0	-0,17	-5,95	-1,13
1,88	-0,06	-5,55	+0,37
2,88	0,00	-4,75	+0,32
3,21	-0,08	-5,12	+0,43
4,19	+0,42	-5,44	+0,38
5,38	0,00	-2,83	+0,44

Тим же дослідником було відмічено, що при випробуванні у вологому повітрі (вміст вологи 9 %, (15-20)°С, повітря змінювалось один раз на добу), до якого домішувалось 1% кисню, вага і вигляд зовнішніх зразків всіх наведених вище сплавів після трьох місячних дослідів помітно не змінились. Результати ще більш тривалих випробувань на корозію у морській воді у природних умовах подвійних алюмінієвих сплавів зі вмістом (4,7-8) % Al наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Швидкість корозії мідно-алюмінієвих сплавів.

Вміст алюмінію, %	Стан зразків	Умови випробувань	Тривалість випробувань, роки	Швидкість корозії	
				мм/дм ² добу	мм/рік
5,1	Холоднокатані листи	Постійне занурення	0,67	8,2	0,038
7,8	Те ж	Те ж	0,67	2,8	0,013
4,7	Холоднокатані листи, травлена поверхня	Змінне занурення	4,1	2,0	0,008
8,0	Литі зразки	Постійне занурення	3	1,4	0,004
8,0	Те ж	Змінне занурення	3	1,1	0,004

При звичайних методах випробувань у морській воді (зануренням) мідно-алюмінієві сплави виявились більш стійкими, ніж олов'яні бронзи та мідно-нікелеві сплави, а в умовах швидкоплинної морської води вони значно перевищують по своїй корозійній стійкості чисту мідь.

Позитивний вплив присадок алюмінію на стійкість міді проти окислення було виявлено і в роботі М.В. Захарова і Т.В. Калініна, що вивчали вплив невеликих домішок алюмінію, цинку, олова, марганцю, магнію, берилію, хрому, нікелю, кадмію, і цирконію на цю властивість міді в інтервалі 500-800°C. В цій роботі встановлено, що найбільший ефект захисту від окислення дає присадка навіть десятків часток відсотку алюмінію. Так, якщо для чистої міді приріст ваги після годинної витримки у повітрі при 700 °С склав 2,47 мг/см², то для сплавів міді, що містять 0,42 % і 0,84 % Al, за тих самих умов приріст ваги склав лише 1,58 і 1,48 мг/см² [2].

Вплив температури і складу на ступінь окислення сплавів після 24-годинної витримки у повітряній атмосфері характеризують криві на рис. 1. Ступінь окислення визначалась за приростом ваги на одиницю поверхні. В цьому ж дослідженні було встановлено, що зовнішня окисна плівка, що виникає на сплавах, складається з Cu₂ O, а внутрішня з двох шарів: 1 – CuO, що містить частинки Al₂ O₃ і 2 – Al₂ O₃

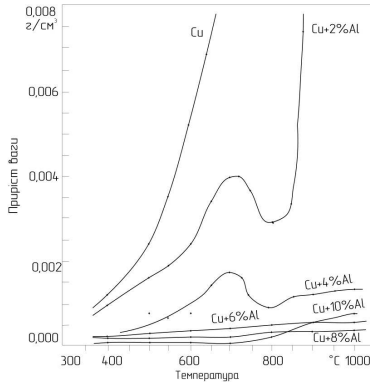


Рис. 1 – Вплив температури і складу на ступінь окислення сплавів (після 24 – годинної витримки у повітряній атмосфері).

Недоліком мідно-алюмінієвих сплавів є схильність їх за деяких умов, при вмісті більше 5 % Al, до вибіркової корозії, в результаті якої сплав збіднюється алюмінієм. Це явище аналогічно збідненню цинком, що спостерігається для мідно-цинкових сплавів. Поряд з цим алюмінієво-мідні сплави на мідній основі в деякому інтервалі складових мають схильність до корозії під напругою. Так, у вищезгаданій роботі А.Е. Гопіуса було встановлено, що нагартвані трубки мідно-алюмінієвих сплавів при випробуванні у вологій аміачній атмосфері, навіть за відсутності навантаження, виявили явище корозійного розтріскування, починаючи із вмісту 1,88 % Al.

Аналогічні результати, що підтверджують схильність мідно-алюмінієвих сплавів у деякому інтервалі складових до корозії під тиском, були отримані і у пізніших за часом роботах. Дослідженням піддавались зразки сплавів, що нагрівались впродовж 1 години при 500 °C після наклепу обжиманням в холодну на 50 %. Чисельні показники властивостей, що були отримані у цьому дослідженні, наведено в табл. 3 [2].

З наведених вище чисельних характеристик виходить, що навіть для сплаву, що містить 1,03 % Al, і має в системі мідно-алюмінієвих сплавів мінімальну стійкість проти корозії під тиском, тривалість дослідження під тиском 7 кг/мм² склала більш 3 діб

Таблиця 3 – Залежність стійкості до корозії мідно-алюмінієвих сплавів від вмісту алюмінію.

Вміст алюмінію, %	Час до руйнування при тиску 7,0 кг/мм ² , у хв.	Швидкість корозії при дослідженні без тиску, мм/рік
0	40000 (не розірвався)	1,07
0,09	40000	1,07
0,24	40000	1,29
0,51	25583	1,09
1,03	10838	0,76
1,98	13323	1,02
4,85	50000	1,09
7,96	–	1,17

За В.Д. Робертсоном, існує пряма залежність між відносною орієнтацією суміжних зерен та сприйнятливості сплаву до міжкристалічної корозії і до корозії під тиском. Межі тих зерен, між якими існує найбільша різниця в орієнтації, більше піддаються впливу реактиву травлення, ніж ті межі, де ця різниця менше. Тому зразки сплавів алюміній-мідь на основі міді, мають стійкість проти корозії під тиском в умовах впливу повітряно-аміачної атмосфери. На рис. 2 наведено криву, що характеризує тривалість дослідження у повітряно-аміачній атмосфері до руйнування під тиском 7 кг/мм² рекристалізованих мідно-алюмінієвих сплавів.

Хімічна стійкість в кислотах. Мідно-алюмінієві сплави мають відносно високу хімічну стійкість в умовах впливу концентрованих і розбавлених розчинів сірчаної кислоти. За даними В.К. Першке і С.Ф. Васютювича, швидкість корозії сплаву, що містить 10 % Al, у сірчаній кислоті концентрацією 60, 70 і 10 % при 80 °С складає відповідно 0,19; 0,10; і 0,96 мм/год.

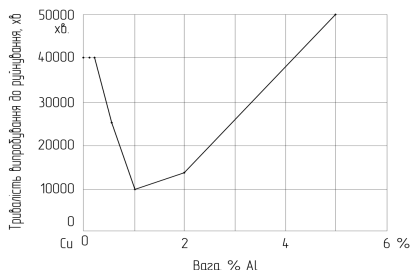


Рис. 2 – Вплив вмісту алюмінію на стійкість рекристалізованих мідно-алюмінієвих сплавів в умовах корозії під тиском.

За даними Р. Кеня, у кислотах, що не містять розчиненого повітря, більшою корозійною стійкістю володіють сплави Al- Cu на основі міді.

Висновки. В результаті проведеного аналізу матеріалів обгрунтована можливість заміни срібного плавкого елемента на плавкий елемент з мідно-алюмінієвого сплаву (95 % міді, 5 % алюмінію), що дозволить значно покращити техніко-економічні показники швидкодіючого запобіжника без суттєвого зниження його захисних характеристик.

Список літератури: 1. Кузнецов Р.С. Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В. – М.: Энергия, 1970. – 543 с. 2. Электротехнический справочник: В 3-х т. Т.2. 3. Вол А.Е. Структура и свойства двойных металлических систем. – М.: Госиздат. Физико-математическая литература, 1959 г. – 755 с. 3. Намитокоев К.К., Хмельницкий Р.С., Анисеева К.Н. Плавкие предохранители. – М.: Энергия, 1979. – 176 с. 4. Намитокоев К.К., Маца И.В., Точилин О.М., Хмельницкий Р.С. Плавкие предохранители серии ПП-31 с алюминевыми токоведущими частями. – Электротехника, 1976, № 1, С. 21-23. 5. Гришук Ю.С. Исследование процесса коммутации и разработка методики расчета быстродействующих предохранителей: Дис. канд. техн. наук. – Харьков. 1980. – 238 с. 6. Намитокоев К.К. Перспективы применения алюминия в плавких предохранителях. – В кн. Проблемы и перспективы развития низковольтного аппаратостроения: Материалы докл. II Всесоюз. конф. по низковольтному аппаратостроению, Чебоксары, 1977, С. 33-41.

Надійшла до редколегії 20.03.2013.

УДК 621.316.925

Дослідження і аналіз матеріалів плавких вставок запобіжників / Гришук Ю.С., Курило Л.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 15 (988). – С. 11-19. Бібліогр.: 6 назв.

Изложены результаты исследований характеристик материалов, которые применяются при изготовлении плавких вставок предохранителей и сплавов на основе меди, а также проведен их сравнительный анализ.

Ключевые слова: быстродействующий предохранитель, плавкий элемент, материалы, сплав медь-алюминий.

Results of investigations of characteristics of materials which are used to manufacture of fuse blocks as well as copper alloys are presented. Besides, their comparative analysis is carried out.

Keywords: quick-break fuse, conducting element, materials, copper-aluminum alloy.