

Ю.С. ГРИЩУК, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков
Ю.Н. МЕЛЕЖИК, магистр, НТУ "ХПИ", Харьков

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПЛАВКИХ ВСТАВОК БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Викладено результати аналізу характеристик матеріалів, що є найбільш перспективними для використання у якості плавких вставок швидкодіючих запобіжників, дякуючи чому стало можливим об'єктивне порівняння таких матеріалів.

Изложены результаты анализа характеристик материалов, наиболее перспективных для использования в качестве плавких вставок быстродействующих предохранителей, благодаря чему стало возможным объективное сравнение таких материалов.

Введение. Интенсивное проведение разработок и рост производства быстродействующих предохранителей (БП) вызвано широким применением силовой полупроводниковой преобразовательной техники, вследствие чего возникла необходимость защиты полупроводниковых вентилях от токов короткого замыкания. В ряде этих и других электротехнических устройств быстродействующие предохранители являются основной или даже единственной токовой защитой. Анализ конструкций БП и их защитных характеристик [1-4] показывает, что, в связи с возросшими к ним требованиями, их технико-экономические характеристики и быстродействие требуют повышения.

Целью данной статьи является проведение обзора и анализа материалов и их сплавов, используемых для плавких вставок БП и выявление возможности их применения с целью улучшения защитных и технико-экономических характеристик БП.

Для решения поставленной задачи ниже рассмотрены и проанализированы ряд существующих применяемых материалов плавких вставок и их характеристики, а также сплавы из этих и других материалов [1-6].

Анализ материалов плавких вставок. В настоящее время для изготовления плавких вставок, как быстродействующих предохранителей, так и высоковольтных и прочих, применяется серебро, медь, цинк и свинец, сплавы из этих и других материалов, включая сплавы, обладающие эффектом памяти формы (например, никелид титана и др.). Для изготовления плавких вставок БП применяется, в основном, серебро; предохранители

телей общепромышленного назначения с наполнителем – серебро и медь. В связи с дефицитом серебра и его высокой стоимостью, работы по его замене проводятся последние десятилетия во многих странах по различным направлениям, однако, радикальное решение пока не найдено.

Плавкие вставки из кадмия позволили уменьшить габаритные размеры предохранителей на 20-25 %. Кадмий – побочный продукт при очистке цинка, представляет собой не дефицитный материал. Большое сечение перешейков, необходимое для компенсации высокого электрического сопротивления кадмия, требует большой энергии для их расплавления. Однако это компенсируется существенно более низкой температурой плавления кадмия (320 °С) по сравнению с серебром (961 °С).

В процессе исследования находятся новые сплавы: алюминий-кадмий, алюминий-медь. Температура плавления алюминия составляет 660 °С, что существенно ниже, чем меди равная 1083 °С. Введение в медь алюминия в количестве, достаточном для образования его оксида на поверхности, должно уменьшить скорость окисления сплава более чем в 8000 раз. Однако при использовании стандартной технологии получения сплава замедление окисления происходит лишь в 36 раз. При применении специальной технологии сплав на основе 95 % *Cu* + 5 % *Al* должен обеспечить защиту от окисления в воздухе при температуре до 800 °С.

Разработан специальный эвтектический сплав золото-кремний с содержанием кремния 3,12 % и температурой плавления 360 °С, обеспечивающий высокую циклическую стойкость предохранителей и надёжность при отключении малых аварийных токов. Влияние механических напряжений и эффекта старения в плавких вставках из этого сплава сведено к минимуму, и срабатывание предохранителя происходит только при достижении тока плавления.

Известны сочетания серебряных и медных участков плавкой вставки. Существует направление по созданию сплавов на основе серебра: серебро-окись циркония – $Ag-ZrO_2$, серебро- станиум $Ag-8\% Sn$, серебро-никель $Ag-Ni$. Механическая прочность на разрыв сплава $Ag-ZrO_2$ при температуре 300-700 °С в 4-5 раз выше, чем у чистого серебра, при более высокой химической стойкости.

До настоящего времени ни одно из изложенных направлений не привело к полному исключению серебра из конструкции плавкой вставки при сохранении требуемых защитных характеристик предохранителей. Поэтому целесообразно изучить основные физические свойства алюминия и меди, близких к серебру, и на основе сопоставительного анализа попытаться рассмотреть возможность их использования (без дорогостоящей разработки и освоения новых материалов и сплавов) с помощью одних лишь конструктивных средств.

В серебре благоприятно сочетаются электрофизические, механические и другие свойства, что обеспечивает длительную надёжную работу быстродействующих и других предохранителей при высокой плотности номинального тока и надёжное отключение аварийного тока с требуемыми защитными характеристиками. Поведение серебра в различных средах характеризуется высокой термодинамической устойчивостью, формированием на его поверхности пассивных защитных плёнок и способностью образовывать в растворах комплексные ионы. При температуре, меньшей точки плавления, серебро обладает значительной стойкостью к образованию оксида. В расплавленном серебре растворяется большое количество кислорода, которое при затвердевании выделяется из раствора в виде оксида серебра или расслаивается в металле в виде пузырьков. Серебро слабо подвержено окислению. Оксидная плёнка Ag_2O нестойкая и разрушается под действием механических усилий и повышенной (до 200 °С и выше) температуре. Слабая химическая активность серебра характеризуется малой энергией образования его соединений с кислородом, серой, углеродом, равной 31 кДж/моль. По ряду других характеристик будем сравнивать серебро с алюминием и медью применительно к предохранителям на один и тот же номинальный ток.

Алюминий – металл высокой коррозионной стойкости и пластичности. Это очень реакционно-способный металл с высоким сродством к кислороду. Обладает высокой стойкостью к большинству самых различных химических реагентов. Эта стойкость обеспечивается оксидной плёнкой, образующейся на его поверхности. В результате в большинстве сред скорость коррозии алюминия быстро падает со временем. На только что обработанной поверхности толщина оксидной плёнки примерно за 10^{-5} с достигает 10^{-9} м. Дальнейший рост её толщины зависит от температуры и влажности среды. Установлено, что основная доля коррозионного разрушения алюминия с потерей прочности 5-40 % происходит в первый год. При высоких температурах и низкой влажности алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью к любым газовым средам, за исключением галогенов и их смесей. Механическая прочность у алюминия, примерно, вдвое меньше, чем у серебра. При повышении температуры прочность алюминия снижается. Вблизи температуры плавления алюминий, как и серебро, имеет низкую прочность на разрыв – порядка $(5,8) \cdot 10^6$ Па. При снижении температуры механические свойства алюминия, как и серебра, улучшаются. Алюминий активно взаимодействует с водой, водными растворами кислот и щелочей, сопоставление характеристик предохранителей на один и тот же номинальный ток и одно и то же напряжение с

плавкой вставкой из серебра и алюминия свидетельствует о следующем. Более высокое (в 1,8 раза) значение удельного электрического сопротивления алюминия может быть скомпенсировано увеличением сечения плавкой вставки. При этом можно достичь того же температурного режима и обеспечить те же потери. Установлено, что при идентичности формы плавкой вставки увеличение его сечения вдвое и применение выводов из алюминия сечением в 2,5 раза больше по сравнению с медными, обычно используемыми в быстродействующих предохранителях, обеспечивает, практически, такой же тепловой режим, как и при использовании вставок из серебра. Например, для предохранителя с номинальным током 400 А и номинальным напряжением 660 В температура на выводах составляет 82-87 °С, а потери мощности – 50-60 Вт. В номинальном режиме, когда температура перешейков не превышает 300 °С, оксидная плёнка лишь $(3,6) \cdot 10^{-10}$ м, что увеличивает сопротивление предохранителя на 0,1-0,3 % и обеспечивает защиту металла от дальнейшего окисления и, значит, стабильность его электрических характеристик.

Преддуговой интеграл предохранителя с плавкой вставкой из алюминия в 1,9-2 раза больше, чем у предохранителя с плавкой вставкой из серебра на те же номинальный ток и напряжение. Эксперименты показали одинаковое значение пропускаемых токов у плавких вставок из алюминия и серебра. Это можно объяснить более высокой скоростью роста напряжения на дуге при расплавлении перешейков из алюминия (10^6 В/с), чему способствует наличие оксидной плёнки, обеспечивающей инерционное накопление и последующее взрывное рассеивание энергии, а также – более высокое катодное падение у алюминия (16,2-18,6 В) по сравнению с серебром (12,1-13,6 В). Алюминий отличается исключительно высоким значением энергии образования соединений с кислородом, серой, углеродом. Аналогичные значения для серебра и меди существенно (на порядок) меньше. При переменном токе значение рассеиваемой в дуге энергии одинаково для алюминиевых и серебряных плавких вставок. В режиме отключения токов КЗ джоулевы интегралы отключения предохранителей с плавкими вставками из серебра и алюминия практически равны. При постоянном токе и определённых параметрах контура КЗ может происходить вторичный тепловой пробой, проявляющийся в повышении тока через предохранитель после 40-100 мс от момента достижения нулевого значения. В этом случае цепь отключается другим защитным аппаратом. Энергия, рассеиваемая в предохранителе до пробоя, на 20-40 % ниже, чем при коммутации переменного тока. Возникновение вторичного пробоя в предохранителях с вставками из алюминия объ-

ясняется образованием оксида алюминия, который под действием постоянного приложенного напряжения и высокой температуры сохраняет достаточно высокую электропроводность. Плавкие вставки из алюминия обладают высокой чувствительностью к любому виду циклических воздействий. Так, БП на номинальный ток 400 А с алюминиевыми плавкими вставками обеспечивают нормальную работу в длительном режиме, но не выдерживают циклическую нагрузку на тот же номинальный ток согласно рекомендациям МЭК 269-4 (18 мин под током, 18 мин пауза), расплавляясь через 89-127 таких циклов. БП на $I_{\text{ном}} = 800$ А выдерживали всего лишь 52-55 таких циклов, хотя падение напряжения и превышения температуры выводов в нормальном режиме были в допустимых пределах. При испытании на старение (8 ч под постоянной нагрузкой номинальным током, 16 ч бестоковая пауза) и предохранители с плавкими вставками из алюминия выдерживали лишь 31-33 цикла (около 260 ч), что значительно меньше аналогичных показателей у предохранителей с серебряными плавкими вставками. Другой особенностью алюминия, как материала плавкой вставки, является сложность отключения предохранителем малых аварийных токов (2,3...3,5) $I_{\text{ном}}$. Это обусловлено тем, что в течение некоторого времени тугоплавкая оксидная оболочка препятствует полному расплавлению и испарению перешейков. Количество теплоты, выделяемой при прохождении таких малых токов, недостаточно для быстрого разрушения оболочки.

Медь – перспективный материал для замены серебра в плавких вставках предохранителей. Мировая добыча меди ежегодно превышает 10 млн.т., т.е. на три порядка выше добычи серебра. Медь дешевле серебра, по меньшей мере, в 300 раз и близка к нему по своим электрофизическим свойствам. Удельное электрическое сопротивление меди на 5-6 % выше, чем у серебра, что легко компенсируется увеличением сечения плавких вставок. Температурные коэффициенты меди и серебра довольно близки и в диапазоне температур 0-100 °С равны соответственно 17 и $19 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Модуль упругости меди в 1,3 раза выше, чем у серебра, что неблагоприятно для циклического режима работы предохранителя. Теплопроводность меди, примерно, на 6 % меньше, чем у серебра, а температура плавления более чем на 120 °С выше. Медь не является химически активным элементом, а скорость её коррозии при нормальной температуре мала. Антикоррозионные свойства меди в значительной степени определяются прочностью защитной оксидной плёнки, замедляющей дальнейшее разрушение металла при воздействии коррозии. Масса плавких вставок предохранителей ПП57, ПП59, ПП60 составляет 10-30 грамм и содержит не более 1-2 % кислорода, необходимого для окисления плавкой вставки.

Тем не менее, необходимо учитывать опасность коррозии перешейков в таких предохранителях. Циклическая стойкость меди в вакууме на порядок выше, чем в воздушной среде (у золота такого рода различия не обнаружено). Надёжная защита поверхности медной плавкой вставки достигается путём нанесения покрытия, например, из никеля или металла, имеющего прочную оксидную плёнку, например, алюминия. Эффективно использование так называемого твёрдого наполнителя сформированного посредством пропитки кварцевого песка жидким связующим веществом с последующим прокаливанием. Образовавшаяся при этом твёрдая структура обеспечивает надёжную защиту поверхности вставки. Для сохранения целостности оксидной плёнки медной вставки эффективно использование изогнутых плавких вставок. Повышенное по сравнению с серебром удельное электрическое сопротивление меди требует увеличения на 6-8 % суммарного сечения плавких вставок для обеспечения заданного теплового режима. Однако более высокое значение константы Мейера [6] у меди ($112 \cdot 10^3 \text{ A}^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4$) по сравнению с серебром ($80 \cdot 10^3 \text{ A}^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4$) предполагает уменьшение поперечного сечения медных вставок на 10-12 % по сравнению с серебряными на тот же номинальный ток для удовлетворения требований к защитным характеристикам. Это теоретическое противоречие обусловлено тем, что при высокой температуре удельное электрическое сопротивление меди растёт медленней, чем у серебра. В связи с этим для получения заданного теплового режима при медных плавких вставках требуется небольшое (2-5 %) увеличение их сечения. В этом случае превышение температуры выводов и потери мощности в предохранителе получаются такими же, как и при серебряных плавких вставках. Некоторое увеличение массы медной плавкой вставки практически не осложняет деионизацию и охлаждение паров металла, поскольку более высокий потенциал ионизации меди, равный 7,77 В (у серебра 7,57 В), и большее катодное падение напряжения, равное 14,7-15,4 В (у серебра 12,1-13,68 В), способствует улучшению гашения дуги. При эквивалентном тепловом режиме циклическая стойкость медных плавких вставок по номинальному току, примерно, на 10 % меньше, чем серебряных.

Расчет защитных характеристик БПс кварцевым наполнителем можно произвести, исходя из динамической вольт-ампер-секундной характеристики горения дуги. Согласно [1-5] динамическая вольт-ампер-секундная характеристика дуги может быть определена теоретически на основе решения дифференциального уравнения теплового баланса дуги, которое имеет вид:

$$c\gamma dT/dt = jE - P_T - P_U - P_K,$$

где c – теплоемкость газа; γ – плотность газа; T – температура; t – время; j – плотность тока; E – градиент напряжения дуги; P_T, P_U, P_K –

мощности теплоотвода путем теплопроводности, излучения и конвекции.

В литературе [1-5] представлен целый ряд математических моделей электрической дуги, полученных в результате решения этого уравнения при различных исходных условиях, допущениях и ограничениях. Приведенный в [1-5] анализ целого ряда этих решений показывает, что теоретический путь определения вольт-амперных характеристик дуги является весьма сложным и приводит к большим погрешностям. Кроме того, ввиду существенного различия исходных условий, эти решения и решения других уравнений электрической дуги [3-6] не могут быть использованы для расчета защитных характеристик БП с ПЭ, изготовленными из меди с покрытием из никеля или алюминия и сплавов на основе меди-алюминия, алюминия-кадмия и др.

Выводы. Проведенный анализ материалов ПЭ показывает, что для повышения быстродействия и улучшения технико-экономических характеристик БП целесообразно использовать медь с покрытием из никеля или алюминия и новые сплавы на основе меди и алюминия 95 % *Cu* + 5 % *Al*. В связи с тем, что существующие математические модели электрической дуги не могут быть использованы для расчета и проектирования таких БП, целесообразно проведение исследований на основе теории планирования эксперимента для построения многофакторных математических моделей, позволяющих осуществлять расчет конструктивных параметров ПЭ и характеристик БП.

Список литературы: 1. Кузнецов Р.С. Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В. – М.: Энергия, 1970. – 543 с. 2. Электротехнический справочник: В 3 т. Т.2. Электротехнические устройства / Под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А. Жуков и др. – М.: Энергоиздат, 1981. – 640 с. 3. Намитокоев К.К., Хмельницкий Р.С., Анисеева К.Н. Плавкие предохранители. – М.: Энергия, 1979. – 176 с. 4. Грищук Ю.С. Исследование процесса коммутации и разработка методики расчета быстродействующих предохранителей: Дис. ...канд. техн. наук. – Харьков, 1980. – 238 с. 5. Намитокоев К.К., Шкловский И.Г., Ильина Н.А. Математические модели дугогашения зарубежных быстродействующих предохранителей. – Электротехническая промышленность. Серия: Аппараты низкого напряжения. – Вып. 2 (87) 1980 – М.: Информэлектро, 1980, С. 2-4. 6. Пастор Ю.А. Тепловая постоянная времени электрической дуги. – Изв.АН Латв.ССР. Серия физ. и техн. наук, – № 6. – 1971. – С. 53-59.

Поступила в редколлегию 15.02.2009