

В.И. ФОМИН, канд. техн. наук, доцент, НТУ "ХПИ", Харьков
Э.А. ГЕЛЯРОВСКИЙ, студент, НТУ "ХПИ", Харьков

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ПЛАВКОГО ЭЛЕМЕНТА НА ЗАЩИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

У статті приведені характеристики матеріалів, з яких вироблено плавкі елементи, та їх вплив на захисні характеристики швидкодіючих плавких запобіжників.

В статье приведены характеристики материалов, из которых изготавливаются плавкие элементы, и их влияние на защитные характеристики быстродействующих плавких предохранителей.

Введение. В настоящее время для изготовления плавких элементов быстродействующих предохранителей применяется, в основном, серебро. В связи с дефицитом серебра и его высокой стоимостью работы по его замене проводятся последние десятилетия во многих странах и по различным направлениям, однако, радикальное решение пока не найдено. Ни одно из известных направлений не привело к полному исключению серебра из конструкции плавкого элемента при сохранении требуемых характеристик предохранителей.

Цель работы – исследование физических свойства близких к серебру алюминия и меди как возможных заменителей материала плавких элементов быстродействующих предохранителей.

Характеристики серебра. Серебро имеет высокую и стабильную электрическую проводимость. Серебряные плавкие элементы хорошо работают в непрерывном, при циклических нагрузках и перегрузках, на воздухе и в песчаном наполнителе. После окончаний этих воздействий электрическое сопротивление серебряного плавкого элемента возвращается к исходному значению. Плавкие элементы из серебра имеют максимальный по сравнению со всеми другими используемыми материалами срок службы. Серебро обладает физическими свойствами, положительно влияющими на защитные характеристики предохранителей, – низкие значения удельной теплоемкости, удельной теплоты плавления и испарения, высокий потенциал ионизации.

Слабая химическая активность серебра характеризуется малой

энергией образования его соединений с кислородом, серой, углеродом, равной 31 кДж/моль. При воздействии высоких температур серебро может окисляться, но окислы серебра неустойчивы, и при температуре выше 180°C они восстанавливаются до чистого серебра [1].

Серебро обладает хорошими технологическими свойствами: легко поддается точной штамповке, сварке и пайке, не требует при этом предварительной обработки.

Характеристики меди. Наиболее близким к серебру физическими свойствами обладает медь, и благодаря этому она широко используется в производстве плавких предохранителей общепромышленного использования. Медь считают одним из самых перспективных материалов для замены серебра в плавких элементах быстродействующих предохранителей. В настоящее время ежегодная мировая добыча меди 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 всего лишь на 5 – 6 % выше, чем у серебра, температурные коэффициенты меди и серебра довольно близки. Теплопроводность меди примерно на 6 % меньше, чем у серебра, а температура плавления более чем на 120°C выше.

Однако медь интенсивно окисляется, а ее окись стабильна вплоть до температуры плавления меди. Благодаря своей стабильности пленка могла бы быть защитной, если бы не механические напряжения, возникающие при изменении температуры и препятствующие адгезии пленки к чистому металлу. Вследствие воздействия этих сил окисная пленка меди растрескивается и отслаивается, облегчая тем самым дальнейшее развитие коррозионных процессов. Как показано в [1], срок службы плавких элементов из меди намного короче срока службы плавких элементов из серебра. Особенно чувствительны плавкие элементы из меди к циклическим нагрузкам. Суммарная длительность протекания тока до расплавления плавкого элемента из меди при циклической нагрузке намного меньше длительности протекания тока через тот же плавкий элемент в непрерывном режиме. Размещение плавкого элемента из меди в кварцевом песке несколько изменяет картину его поведения. Хотя при нагрузке срок службы плавкого элемента из меди в песчаном наполнителе почти такой же, как и его срок службы на воздухе, но вследствие более равномерного распределения температуры вдоль плавкого элемента циклические перегрузки оказывают не столь разрушительное действие, как на воздухе. К сожалению, гальваническое серебрение не позволяет надежно защитить медный плавкий элемент от окисления.

Использование медных плавких элементов возможно при условии обеспечения надежной защиты их поверхности от воздействия окружающей среды,

сохранения целостности оксидной пленки и оптимального выбора номинального режима предохранителя. Надежная защита поверхности медного плавкого элемента от воздействий среды, в частности от окисления, может быть достигнута путем нанесения покрытия, например, из никеля или металла, имеющего прочную оксидную пленку, например, алюминия. Эффективно использования так называемого твердого наполнителя, сформированного посредством пропитки кварцевого песка жидким связывающим веществом с последующим прокаливанием. Образовавшаяся при этом твердая структура обеспечивает надежную защиту поверхности элемента. Для сохранения целостности оксидной пленки медного элемента эффективно использование изогнутых плавких элементов.

Характеристики алюминия. В связи с тем, что во всем мире запасы меди и серебра быстро истощаются, и уже в настоящее время ощущается недостаток этих материалов, в ближайшем, вероятно, в качестве материала плавких элементов получит большое распространение третий высокопроводящий материал – алюминий. Самыми главными его достоинствами являются низкая стоимость и большие запасы в земной коре. Удельное электрическое сопротивление алюминия на 70% выше, чем у серебра. Электрическое сопротивление алюминиевых плавких элементов стабильно при длительном протекании номинального тока, что обусловлено наличием тонкой окисной пленки, защищающей металл от дальнейшего окисления. Окисная пленка имеет хорошую адгезию с алюминием и не разрушается при нагреве вплоть до температуры плавления. Но именно наличие окисной пленки затрудняет процессы пайки и сварки алюминиевых плавких элементов. Значительные успехи, достигнутые в последнее время в этой области, безусловно, будут способствовать быстрому внедрению алюминия в производство плавких предохранителей

Распространенное некоторое время тому назад мнение о том, что из-за окисной пленки ток короткого замыкания плавким элементом из алюминия не прерывается, и при достижении температуры кипения алюминия не подтвердилось. Исследования показали, что при отключении токов короткого замыкания влияние окисной пленки несущественно. И только при токах перегрузки, близких к пограничному, наблюдается длительное протекание тока по жидкому алюминию.

Экзотермическая реакция, развивающаяся в предохранителе при его срабатывании, может привести к выделению дополнительной энергии. Алюминий отличается исключительно высокими значениями энергии образования соединений с кислородом, серой и углеродом, равным 1673 кДж/моль. Аналогичные значения для серебра и меди равны соответственно 31 и 168 кДж/моль.

Обзор литературы по данному вопросу показал, что имеется мало данных по влиянию материала плавкого элемента на защитные характеристики быст-

родействующих плавких предохранителей. В [2] указано, что ввиду образовавшегося в столбе дуги весьма высокого давления основная часть расплавленного металла широкой части плавкого элемента разбрызгивается в окружающий наполнитель, а меньшая часть его (не более 10 %) испаряется. Поэтому отношение паров металла плавкого элемента к кремнию составляет 1:80 в кварцевом песке. Таким образом, дуга горит практически в парах наполнителя и, значит, независимо от материала плавкого элемента. Расчетное значение давления дуги находилось в пределах 6-10 Па и определялось, в основном, параметрами наполнителя.

Исследования плавких элементов из различных материалов. Исследовались быстродействующие плавкие предохранители на номинальный ток 630А, номинальное напряжение 660 В.

Плавкий элемент имеет следующие параметры:

материал плавкого элемента – серебро, медь, алюминий; b – толщина плавкого элемента, 0,01 см; b_0 – ширина перешейка, 0,015 см; D – диаметр отверстия, которыми образуются параллельные перешейки, 0,15 см; n – число последовательных перешейков, $n = 4$; l – расстояние между соседними последовательными перешейками, 1,0 см; ширина ветви B определялась из соотношения $B = B + b_0$.

По методике, представленной в [3] были проведены расчеты числа параллельных ветвей (сечение плавкого элемента), исходя из заданного превышения температуры 90°С на выводах предохранителя. Для расчета сечения плавкого элемента необходимо знать сопотивление модуля плавкого элемента с учетом неравномерного распределения плотности тока по его сечению. Это связано с тем, что плавкий элемент имеет узкие перешейки и широкие части, которые значительно отличаются размерами. Кроме того, современные быстродействующие предохранители имеют близко расположенные последовательные перешейки, вследствие чего области стягивания их перекрывают друг друга, и участки с параллельным расположением трубок тока практически отсутствуют.

Результаты расчета основных параметров плавких элементов (ПЭ) приведены в табл. 1. Так как материал плавкого элемента был различным, то плавкий элемент на номинальный ток 630 А имел различное число параллельных ветвей m . Остальные обозначения: ψ – начальная фаза включения, рад.; $I_{к.з.}$ – эффективное значение тока короткого замыкания, кА; $t_{пл}$ – время до образования электрической дуги, мс; $\int_{пл}$ – преддуговой интеграл, А²с; $t_{откл}$ – полное время отключения цепи, мс; $\int_{откл}$ – интеграл отключения, А²с; $I_{отр}$ – максимальный пропускаемый ток (ток ограничения), кА; $U_{макс}$ – максимальное напря-

Таблица 1 – Расчетные значения основных параметров плавких элементов.

Материал ПЭ	m	ψ	$I_{к.з.}$	$t_{пл}$	$\int_{пл.} \cdot 10^3$	$I_{откл.}$	$\int_{откл.} \cdot 10^5$	$I_{огр.}$	$U_{макс.}$	$L_{выг.}$		
Ag	73	0	10	4,25	95,4	8,71	4,66	11,69	1888	0,62		
			100	1,60	98,7	4,08	5,12	17,71	1232	0,35		
		0,3	10	3,46	95,9	7,86	4,67	11,77	1869	0,61		
			100	0,98	100,2	3,17	5,90	19,51	1365	0,38		
		0,6	10	2,95	95,5	7,19	4,57	11,81	1818	0,58		
			100	0,73	102,1	2,63	7,26	24,10	1617	0,42		
		0,9	10	2,67	96,1	6,68	4,36	11,62	1660	0,52		
			100	0,61	101,4	2,35	8,35	27,44	1829	0,46		
		1,2	10	2,55	95,6	6,38	3,85	10,96	1370	0,42		
			100	0,55	99,1	2,20	8,78	29,01	1908	0,47		
		1,5	10	2,60	95,4	6,18	3,05	9,98	972	0,30		
			100	0,54	103,1	2,13	8,72	29,06	1844	5,45		
		Cu	80	0	10	4,73	150,6	8,65	5,15	12,54	2006	0,62
					100	1,75	152,9	3,73	5,45	20,76	1268	0,34
0,3	10			3,92	149,7	7,80	5,12	12,58	1996	0,61		
	100			1,11	155,2	2,92	6,16	22,45	1413	0,37		
0,6	10			3,40	150,0	7,15	5,05	12,60	1942	0,58		
	100			0,84	159,9	2,47	7,42	25,21	1680	0,41		
0,9	10			3,11	150,4	6,66	4,79	12,38	1780	0,52		
	100			0,71	161,9	2,22	8,42	28,56	1899	0,45		
1,2	10			3,01	150,4	6,38	4,28	11,79	1477	0,43		
	100			0,64	156,7	2,09	8,81	30,02	1990	0,46		
1,5	10			3,11	149,5	6,25	3,45	10,85	1047	0,30		
	100			0,63	163,2	2,02	8,76	30,14	1932	0,44		
Al	122			0	10	4,75	153,2	8,92	5,48	12,74	1837	0,62
					100	1,76	157,3	3,75	6,08	21,10	1285	0,37
		0,3	10	3,94	152,4	8,06	5,45	12,78	1828	0,61		
			100	1,12	160,2	2,97	6,92	22,84	1424	0,40		
		0,6	10	3,42	152,8	7,38	5,34	12,80	1784	0,58		
			100	0,84	159,9	2,54	8,25	27,06	1662	0,45		
		0,9	10	3,13	153,2	6,85	5,03	12,58	1646	0,52		
			100	0,71	161,9	2,30	9,50	30,35	1872	0,49		
		1,2	10	3,03	153,1	6,52	4,44	11,92	1380	0,43		
			100	0,65	164,2	2,16	10,07	32,06	1958	0,50		
		1,5	10	3,14	153,1	6,32	3,55	10,91	1006	0,31		
			100	0,63	163,2	2,09	9,84	31,93	1894	0,48		

жение на предохранителе, V ; $l_{\text{выг}}$ – длина выгорания модуля плавкого элемента, см.

Для определения сопротивления модуля плавкого элемента, имеющего произвольную (известную) форму перехода от перешейка к широкой части, использовались результаты исследований, приведенные в работе [3].

Далее по методике, изложенной в [3], были проведены расчеты защитных характеристик быстродействующих плавких предохранителей с плавкими элементами из различных материалов при следующих параметрах контура короткого замыкания переменного тока частотой 50 Гц.

$$I_{\text{к.з.}} = 10 \text{ кА}, U_{\text{с}} = 730 \text{ В}; \cos\alpha = 0,3; \psi = 0; 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5.$$

$$I_{\text{к.з.}} = 100 \text{ кА}; U_{\text{с}} = 730 \text{ В}; \cos\alpha = 0,1; \psi = 0; 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5.$$

Выводы. Как видно из результатов проведенных исследований, в режиме отключения токов КЗ защитные характеристики предохранителей с плавкими элементами из серебра, меди и алюминия практически одинаковые.

Список литературы: 1. *Намитоков К.К., Хмельницкий Р.С., Аникеев К.Н.* Плавкие предохранители. – М.: Энергия, 1979. – 176 с. 2. *Намитоков К.К., Ильина Н.А., Шкловский И.Г.* Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с. 3. *Фомин В.И.* Определение тепловых и коммутационных характеристик быстродействующих предохранителей на стадии проектирования: Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1983. – 204 с.

Поступила в редколлегию 16.11.2009