

УДК 539.216.2:537.311.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛЁНОК НА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

В.В. Измайлов, М.В. Новоселова

Тверской государственный технический университет,
170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 26
iz2v@tvcom.ru

Описаны результаты сравнительных испытаний электрической прочности плёнок на поверхности различных металлических электроконтактных материалов.

Свойства поверхностных плёнок, в том числе процессы их механического и электрического разрушения, оказывают большое влияние на надёжность и качество электроконтактных устройств различного назначения. В работе [1] описаны результаты экспериментального исследования механической прочности поверхностных плёнок на электроконтактных металлах. В данной статье представлены результаты испытаний на электрическую прочность непроводящих плёнок на поверхности электроконтактных материалов.

Методика проведения экспериментов

Были исследованы две группы электроконтактных материалов. Первая группа представляет собой металлы с высокой твёрдостью: молибден *Mo*, вольфрам *W* и хром *Cr*. Данные металлы в виде порошков обычно используют для изготовления композиционных электроконтактных материалов. Вторая группа включает в себя традиционные широко используемые электроконтактные материалы: электротехническая медь *Cu*, латунь ЛС59-1 (60% *Cu*, 18% *Zn*, 2% *Pb*), технический алюминий, алюминиевый сплав АД31 (2% *Mg*, 0,5% *Si*).

Испытания поверхностных плёнок на электрическую прочность проводили на том же приборе, который использовался при исследовании механического разрушения плёнок [1]. Нагрузка на контакт соответствовала вероятности механического разрушения $P \approx 30\%$. На замкнутый контакт подавали линейно увеличивающееся напряжение, которое фиксировалось на самопишущем вольтметре. В момент пробоя плёнки наблюдалось резкое падение напряжения. Максимальное его значение принималось за величину напряжения пробоя $U_{пр}$. Отмечено, что величина $U_{пр}$ существенно различается в различных точках одной и той же металлической поверхности. Это можно объяснить, во-первых, неоднородностью толщины

и свойств плёнок, во-вторых, наличием шероховатости на поверхности исследуемого образца. Вследствие шероховатости зонд контактирует с отдельными микровыступами с различным радиусом закругления вершины.

Экспериментальные результаты обрабатывали методами математической статистики с определением среднего значения пробивного напряжения и доверительного интервала при 95%-й доверительной вероятности.

Результаты экспериментов и обсуждение

Результаты исследования электрического разрушения естественных поверхностных плёнок на твёрдометаллических материалах и электротехнической меди приведены в таблице 1. Естественные плёнки представляют собой поверхностные слои, образовавшиеся на образцах в обычных лабораторных условиях в течение нескольких месяцев без поддержания на каком-либо определенном уровне температуры, состава атмосферы, влажности и т.п.

По экспериментально определённой величине U_{np} и известной пробивной напряжённости E_{np} [2, 3] оценивали толщину d оксидных плёнок. Рассчитанные таким образом величины толщин поверхностных плёнок исследованных металлов согласуются с литературными значениями (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики поверхностных плёнок на электроконтактных металлах

Металл	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>
Пробивное напряжение U_{np} , В при 20 °С	0,62 ± 0,28	0,29 ± 0,13	2,91 ± 0,58	0,86 ± 0,05
Пробивная напряжённость E_{np} , 10 ⁸ В/м	0,53	0,3	-	1,1
Расчётная толщина плёнок d , нм	12	10	-	8
Толщина плёнок d , нм (литературные данные)	~10 [4]	~10 [4]	-	~10 [5]
Температура контакта $T_{конт}$, °С при U_{np}	2006 ± 905	973 ± 436	-	-
$T_{плав}$, °С	3693	2893	2163	1356
Гомологическая температура контакта $\Theta = T_{конт}/T_{плав}$	0,54	0,34	-	-

Оценим температуру на пятне контакта в момент электрического пробоя плёнки. Для этого воспользуемся уравнением [5]

$$T_{\text{конт}}^2 - T_0^2 = U_{\text{пр}}^2 / (4L),$$

где $T_{\text{конт}}$ – температура контакта; $T_0 = 293\text{K}$; $L = 2,44 \cdot 10^{-8} \cdot B^2 / K^2$ – число Лоренца. Как видно из таблицы 1, для вольфрамовых и молибденовых образцов температура контакта в момент пробоя достигает температуры рекристаллизации исследованных металлов, которая составляет примерно 0,4 – 0,5 абсолютной температуры плавления. При рекристаллизации происходит размягчение металла, поэтому напряжение, соответствующее температуре рекристаллизации, в теории электрических контактов называют напряжением размягчения [5]. Следствием рекристаллизации является уменьшения твердости металла, в результате чего увеличивается площадь контакта, снижаются его сопротивление и температура перегрева контакта. Все это свидетельствует о неразрывной связи процессов электрического и механического разрушения поверхностной плёнки.

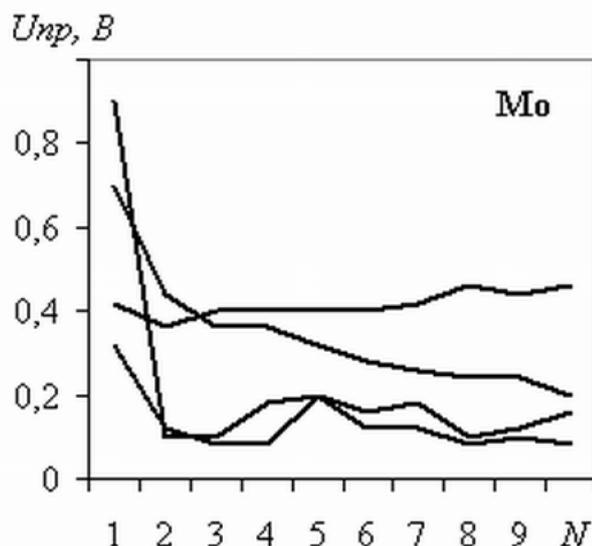


Рис. 1. Зависимость напряжения пробоя поверхностных плёнок от числа пробоев для различных точек поверхности образца.

Для хромовых и медных образцов расчётная температура контакта в момент пробоя превышает температуру плавления металла.

При многократном пробое в одной и той же точке пробивное напряжение после возможного первоначального снижения в дальнейшем остается постоянным (рис.1). Это можно считать проявлением эффекта самозалечивания, часто наблюдающегося в тонкоплёночных структурах [6].

Результаты экспериментов для второй группы металлов приведены в таблице 2. Образцы данных материалов окислялись при различной температуре в течение 5 часов. За это время происходит основное увеличение толщины плёнок, в дальнейшем прирост толщины незначителен [4, 7]. Затем производили измерение напряжения пробоя

плёнки в двух температурных режимах: непосредственно при температуре окисления и после остывания образца при комнатной температуре.

Таблица 2. Значения напряжения пробоя ($U_{пр}$, В) поверхностных плёнок на металлах. Числитель – при температуре окисления, знаменатель – при температуре 20 °С.

Металл	Температура окисления, °С			
	20	50	100	150
Медь	<u>0,86 ± 0,09</u>	<u>0,26 ± 0,05</u>	<u>0,95 ± 0,38</u>	<u>2,86 ± 0,43</u>
	0,86 ± 0,09	1,05 ± 0,19	1,32 ± 0,11	12,7 ± 1,21
Латунь ЛС59-1	<u>1,66 ± 0,56</u>	<u>0,35 ± 0,04</u>	<u>0,20 ± 0,02</u>	<u>0,16 ± 0,05</u>
	1,66 ± 0,56	0,40 ± 0,07	0,37 ± 0,04	0,95 ± 0,34
Алюминий технический	<u>1,66 ± 0,10</u>	<u>11,5 ± 2,3</u>	<u>2,76 ± 0,57</u>	<u>1,13 ± 0,11</u>
	1,66 ± 0,10	5,67 ± 1,56	6,13 ± 1,72	3,93 ± 0,85
Алюминиевый сплав АД31	<u>1,88 ± 0,12</u>	<u>9,58 ± 2,25</u>	<u>1,27 ± 0,25</u>	<u>1,38 ± 0,16</u>
	1,88 ± 0,12	5,85 ± 1,56	1,67 ± 0,09	2,69 ± 0,23

Из анализа данных таблицы 2 следует, что у исследованных металлов при комнатной температуре напряжение пробоя лежит в диапазоне 1 – 2 В. При повышенных температурах в горячих контактах наблюдается противоположное влияние двух факторов: повышение температуры способствует пробоем, поэтому пробивное напряжение снижается с ростом температуры, но в то же время растет толщина поверхностной плёнки, что приводит к увеличению напряжения пробоя. У тех металлов, на которых толщина плёнки увеличивается незначительно в исследованном диапазоне температур (латунь, алюминий и сплав АД31), преобладает первый фактор и напряжение пробоя падает. У меди, на которой толщина плёнки существенно увеличивается с температурой, преобладает второй фактор, и напряжение пробоя сначала падает, затем растет.

В холодном контакте (температура испытания 20°С) напряжение пробоя плёнки на меди растет монотонно вслед за ростом толщины плёнки. Более сложное поведение напряжения пробоя на латуни и алюминии можно, на наш взгляд, объяснить следующим. Уменьшение напряжения пробоя на латуни для плёнок, полученных при температуре 50 и 100°С, по сравнению с естественной плёнкой, связано, по-видимому, с десорбцией физически адсорбированных молекул при нагреве. В результате хотя толщина оксидной плёнки практически не меняется, общая толщина плёнки при нагреве уменьшается и напряжение пробоя падает. Небольшое уменьшение напряжения пробоя плёнок на алюминии можно объяснить наличием остаточных механических напряжений в плёнке, возникающих при охлаждении образца из-за разницы температурных коэффициентов расширения алюминия и его оксида.

Таблица 3. Значения характерных напряжений для электроконтактных металлов

Металл	Медь	Алюминий
Напряжение пробоя, В	0,86	1,7
Напряжение размягчения, В	0,12	0,10
Напряжение плавления, В	0,43	0,30

Интересно сравнить величину пробивного напряжения с так называемыми напряжениями размягчения (рекристаллизации) и плавления металлов [8] (табл. 3).

И для меди, и для алюминия напряжение пробоя превышает напряжение плавления металла, откуда можно заключить, что процесс электрического разрушения связан скорее с явлениями в самой плёнке, чем в металлической подложке.

Для подтверждения рассчитаем напряжённость электрического поля в плёнке при наступлении пробоя. Для этого используем значения пробивного напряжения (табл. 2) и толщин плёнок на электроконтактных металлах второй группы из работы [1]. Рассчитанные таким образом величины пробивной напряжённости приведены в таблице 4.

Таблица 4. Расчётные значения напряжённости электрического поля ($E_{np}, 10^8 \text{ В/м}$) в плёнке в момент пробоя. Числитель – при температуре окисления, знаменатель – при температуре 20°C.

Металл	Температура окисления, °С			
	20	50	100	150
Медь	<u>4,3</u>	<u>0,26</u>	<u>0,19</u>	<u>0,26</u>
	4,3	1,05	0,26	1,15
Латунь ЛС59-1	<u>16,6</u>	<u>2,3</u>	<u>0,15</u>	<u>0,10</u>
	16,6	2,7	0,28	0,58
Алюминий технический	<u>5,5</u>	-	<u>3,7</u>	<u>1,3</u>
	5,5	-	8,2	4,4
Алюминиевый сплав АД31	<u>6,3</u>	-	<u>1,6</u>	<u>1,5</u>
	6,3	-	2,1	3,0

Следует отметить, что в таблице 4 в целом наблюдаются все типичные зависимости E_{np} от внешних факторов. Согласно работе [6], пробивная напряжённость уменьшается с ростом толщины плёнки. При температуре 20°C самые тонкие пленки на латуни [1], для нее самая большая пробивная напряженность. С ростом толщины плёнки и температуры окисления величина E_{np} , как правило, уменьшается.

Относительное постоянство пробивной напряженности для данных металлов свидетельствует о наличии общих механизмов пробоя в поверхностных плёнках. Полученные значения E_{np} характерны для пробоя различных по природе структур металл-диэлектрик-металл и металл-

полупроводник-металл [6]. Характерно, что для всех основных механизмов пробоя, а именно: эмиссии электронов с катода, ударной ионизации диэлектрика, образования отрицательного объемного заряда – требуется напряженность электрического поля в диапазоне $10^8 - 10^9$ В/м. Для ударной ионизации в работе [6] приводится выражение для электрической прочности диэлектрика

$$E_{np} = \left[4(2m)^{1/2} \phi_{эфф}^{3/2} W / (3\hbar q^2) \right]^{1/2} (1/d)^{1/2}, \quad (1)$$

где q и m – заряд и масса электрона; \hbar – постоянная Планка, W – разность между энергиями электрона до и после ионизации; $\phi_{эфф}$ – эффективная высота потенциального барьера; d – толщина плёнки. В таблице 5 приведены значения E_{np} , рассчитанные по формуле (1) для типичных значений $\phi_{эфф}$ и d . Эти значения пробивной напряжённости не противоречат нашим экспериментальным результатам (табл. 4).

Таблица 5. Значения E_{np} , 10⁸ В/м, рассчитанные по формуле (1)

d , нм	$\phi_{эфф}$, эВ				
	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0
5	4,3	7,2	14,4	24,1	40,6
10	3,0	5,1	10,2	17,1	28,7
50	1,4	2,3	4,5	7,6	12,8
100	1,0	1,6	3,2	5,4	9,1

Библиографический список

1. Измайлов, В.В. Исследование механического разрушения поверхностных плёнок на электроконтактных материалах / Измайлов В.В., Новоселова М.В. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. – Тверь: Твер. Гос. ун-т, 2009. – Вып. 1. – С. 42-48.
2. Технология тонких пленок: Справочник. Т. 2. – М.: Сов. радио, 1977. – 768 с.
3. Tamai, T. Electrical conduction mechanisms of electric contact covered with contaminant films / T. Tamai // Surface contamination: genesis, detection and control. V.2. N.Y. – London: Plenum Press, 1979. – P. 967-981.
4. Окисление металлов / под ред. Ж. Бенара. – М.: Металлургия, 1969. – Т.2. – 444 с.
5. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. – 464 с.
6. Воробьев, Г.А. Пробой тонких диэлектрических плёнок / Г.А. Воробьев, В.А. Мухачев. – М.: Сов. радио, 1977. – 72 с.
7. Свиташева, С.Н. Исследования процессов образования пленки естественного окисла на поверхности меди методом эллипсометрии / С.Н. Свиташева, Р.И. Любинская, К.К. Свиташев // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1986. – № 11. – С. 80-85.
8. Основы теории электрических аппаратов / Под ред. И.С. Таева. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.