

## Некоторые особенности измерения дугостойкости электроизоляционных эмалей.

Маслов В.А., Гроздов А.Г., Власенко Д.С.  
Электротехника, 2009, №7, С.26-30

Современная электротехническая промышленность использует разнообразные эмали, покрытия из которых после высыхания обладают необходимыми диэлектрическими свойствами. Одним из показателей, характеризующих электроизоляционные материалы, является дугостойкость или иначе стойкость к действию электрической дуги. Этот показатель весьма важен для изоляционных материалов, применяемых при изготовлении высоковольтных распределительных устройств, прерывателей и выключателей с дугогасительными камерами, выключателей электропоездов и электротранспорта. Тем более важно насколько корректно и правильно измеряется дугостойкость электроизоляционных материалов и, в частности, эмалей.

На настоящий момент существует два метода определения дугостойкости – «метод непрерывной дуги», описанный в ГОСТ 9151-75 [1] и «метод прерывистой дуги», ГОСТ 10345.1-78 [2]. Первый из этих методов был предложен для определения дугостойкости покрытий на основе конкретной эмали ГФ-92. В последующие годы этот метод стал применяться для оценки дугостойкости и других эмалей. «Метод прерывистой дуги», стандартизованный в ГОСТ 10345.1-78, появился в связи с созданием единой системы международных стандартов, разрабатываемых «Международной электротехнической комиссией» (МЭК). В настоящее время нет единого мнения о том, какой из вышеназванных стандартов следует использовать для определения дугостойкости эмалей.

Оба метода измерения дугостойкости проводятся на принципиально мало отличающихся установках, основной рабочий элемент которых представлен на рис.1.

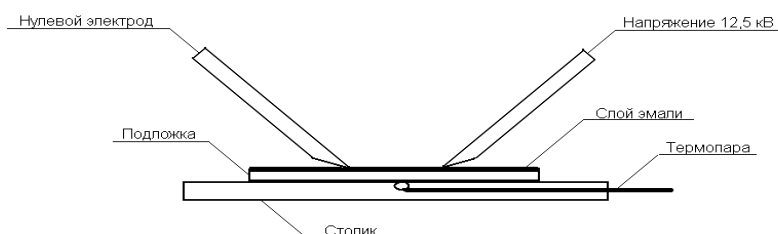


Рисунок 1 Схема ячейки для проведения испытаний на дугостойкость.

К образцу материала (пластику или эмали) прижимаются два электрода. На один из них подается напряжение, второй заземлен. При 12,5 кВ зажигается дуга. Прибором устанавливается определенный ток дуги. За дугостойкость принимается время от начала возникновения дуги до момента возникновения токопроводящей дорожки между электродами или до воспламенения материала. Методы отличаются непрерывной или прерывистой дугой соответственно, расстоянием между электродами и углом их наклона к плоскости образца, а также геометрией электродов. Метод прерывистой дуги характеризуется также различным режимом пульсации дуги. На определенном этапе испытания пульсирующий режим переходит к непрерывной дуге с увеличивающимся током дуги (Таблица 1).

Таблица 1. Режим пульсации дуги по методике ГОСТ 10345.1 –78.

Степень	Ток дуги, мА	Продолжительность выдержки на каждой стадии степени, с	Горение дуги	Время горения дуги между перерывами, с	Длительность перерывов в горении дуги, с	Суммарное время испытания, с
1	10	60	Прерывистое	0,25	1,75	60
2	10	60	То же	0,25	0,75	120
3	10	60	То же	0,25	0,25	180
4	10	60	Непрерывное	-	-	240
5	20	60	То же	-	-	300
6	30	60	То же	-	-	360
7	40	60	То же	-	-	420

Определение дугостойкости по ГОСТ 9151-75 является более жестким, чем по ГОСТ 10345.1-78. Однако из-за коротких времен стойкости эмалевых покрытий к действию непрерывной дуги (как правило, оно составляет несколько секунд) большой вклад в разброс определяемых значений вносит качество покрытий, их однородность, мелкие нарушения при проведении испытаний. По методу прерывистой дуги получаются более высокие значения дугостойкости, разброс между параллельными испытаниями меньше, легче определяется различие между образцами эмалей разной природы. Следует иметь в виду, что эмали часто защищают именно от прерывистых, искровых воздействий дуги и коронных разрядов. Поэтому «метод прерывистой дуги» можно считать более предпочтительным.

В отличие от ГОСТ 10345.1-78 в ГОСТ 9151-75 не указан ни диаметр электродов, ни угол их заточки, тем не менее, это очень важно. В зависимости от угла заточки электрода на его окончании при возникновении дуги получается различная напряженность электрического поля и, соответственно, различное температурное поле. Из-за этого при испытаниях одних и тех же образцов на разных установках могут получаться различные результаты. Так как дугостойкость эмалей при испытаниях постоянной дугой очень мала и составляет несколько секунд, геометрия заточки электродов может сыграть значительную роль.

Существенное значение для определения дугостойкости имеет и положение электродов относительно испытуемого образца. Хотя в обоих ГОСТ указано, что электроды должны плотно прилегать к испытываемому образцу, а в ГОСТ 10345.1-78 даже указано усилие прижима, иногда, вследствие дефекта эмали или особенностей установки, может возникать зазор между одним из электродов и поверхностью образца. Уже при зазоре между электродом и образцом более 0,1 мм значение дугостойкости испытываемого материала существенно возрастает. Так при определении дугостойкости эмали ГФ-92ГС по ГОСТ 9151-75 при прижатых электродах она составила 4 с, при зазоре под одним из электродов 0,1 мм – 25 с, 0,4 мм – 58 с, 0,6 мм – 70 с, т.е. уже при таких малых зазорах измеряемые значения могут отличаться почти в двадцать раз.

При испытаниях по ГОСТ 10345.1-78 следует обращать внимание на поворот электрода вокруг своей оси (электрод имеет плоский срез под 30° к оси прутка). Этот поворот может привести к тому, что электрод будет касаться образца не заостренным кончиком, а краем среза электрода и образующаяся дуга также может идти над поверхностью образца, увеличивая измеряемое время дугостойкости. Смоделированная ситуация с поворотом электрода на 45° для эмали ГФ-92ГС при непрерывной дуге показала результат 120 с, в то время как при правильном расположении электродов она составила 4 с.

Важным условием корректного определения показателя дугостойкости эмалей, очевидно, является материал подложки, на которую нанесена эмаль. По ГОСТ 9151-75 эмаль должна наноситься на карболитовую пластину толщиной 3-4 мм с дугостойкостью не более 2,5 с. Однако, такого листового материала на данный момент не существует. «Карболит» – это вид феноло-формальдегидной смолы, на основе которой получают листовые материалы «текстолит» или «гетинакс» [3]. Поэтому при определении дугостойкости практически всегда применяют в качестве подложки для эмали гетинакс или текстолит. В ГОСТ 10345.1-78 материал подложки не нормирован – он должен быть указан в технической документации на эмаль.

Мы исследовали влияние материала подложки на определяемое значение дугостойкости ряда электроизоляционных эмалей. При невысокой дугостойкости и достаточно хорошей электрической прочности эмалевого покрытия (более 50 кВ/мм) материал подложки не оказывал особого влияния на результаты испытаний дугостойкости. Однако при низкой электрической прочности эмали при определении дугостойкости эмалевого покрытия на металлической пластинке на начальной стадии испытания проходил электрический пробой под электродами и измерения прекращались, хотя токопроводящей дорожки между электродами не образовывалось и реального времени дугостойкости определить не представлялось возможным.

С другой стороны, при высокой дугостойкости независимо от марки эмали на образцах, где подложкой служили гетинакс или текстолит достигался определенный временной предел (в случае прерывистой дуги – 125-130 с).

Было выдвинуто предположение, что образование токопроводящей дорожки происходит по подложке. Действительно, при температуре дуги около 2000°C и длительном испытании должен происходить разогрев не только эмалевого покрытия, но и материала подложки.

Экспериментально определили изменение температуры подложки от длительности воздействия дуги. Измерение проводилось с нижней стороны пластинки с нанесенной эмалью под местом приложения электродов (рис.1). В качестве подложки использовались текстолитовые, стеклянные и металлические пластины. Как видим (рис.2), при длительном испытании эмалевого покрытия происходит интенсивный разогрев пластин в зоне горения дуги. Интенсивность нарастания температуры подложки хорошо согласуется с коэффициентом теплопроводности подложки (текстолит – 0,3 Вт/м.К, стекло – 1,2 Вт/м.К, металл (сталь 3) – 50 Вт/м.К). Изломы на

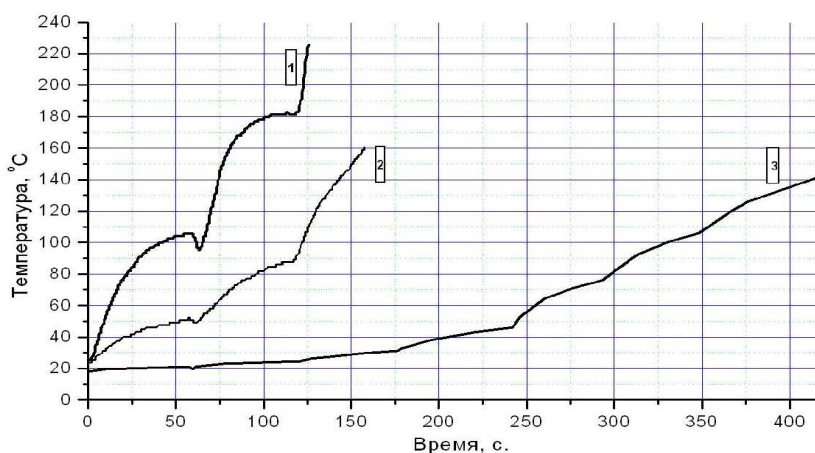


Рисунок 2. Зависимость температуры подложки от времени горения дуги. 1 – текстолит, 2 – стекло, 3 – металл.

кривых соответствуют переключению режимов пульсации дуги. Если учесть тепловые потери на подложке, градиент по температуре от испытываемой эмали к нижней поверхности пластинки, можно предположить, что фактическая температура на поверхности эмали существенно выше показанной на графике. Косвенным подтверждением является то, что при испытании одной и той же эмали, нанесенной на различные подложки, мы получили существенно более низкие результаты на текстолитовой подложке. Скорее всего, образование токопроводящей дорожки прошло непосредственно на текстолите вследствие его термической деструкции. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что существенное влияние на время дугостойкости оказывает материал подложки, а именно его коэффициент теплопроводности и что при дугостойкости менее 30-50 с материал подложки никак не должен сказаться на результатах испытаний, так как при этом подложка не прогревается до температуры начала деструкции.

Было решено исследовать возможность использования в качестве подложки при испытаниях дугостойкости стеклянные пластинки, ввиду того, что стекло является диэлектриком и обладает существенно более высокой теплопроводностью, чем гетинакс. Однако в ходе проведенных испытаний выяснилось, что стеклянные пластинки не выдерживали длительных испытаний при постоянной дуге и разрушались от перегрева.

Таблица 2. Зависимость времени дугостойкости эмалевого покрытия от типа подложки.

Марка эмали	Толщина покрытия, мкм.	Время дугостойкости по ГОСТ 103345.1-78., с		
		Гетинакс	Стекло	Металл
ДИЭЛ-ЭД-15	110	125	175	>420

Механизм разрушения эмалевого покрытия под воздействием электрической дуги хорошо просматривается на фотографиях покрытий, полученных на основе эмали ДИЭЛ-ЭД-15, снятых на различных стадиях испытания (рис.3). Испытания проводили на текстолитовых (фотографии 1-4, - 20 с, 60 с, 120 с, 127 с соответственно) и стеклянных (фотографии 5-8, - 80 с, 120 с, 170 с, 180 с соответственно) пластинках. Видно, что при использовании в качестве подложки текстолитовой пластинки, практически сразу у электродов начинается деструкция эмалевого покрытия с его растрескиванием. С течением времени разрушение покрытия между электродами увеличивается. При этом происходит вспучивание покрытия, что резко уменьшает теплоотвод на подложку и, как следствие, быстрое образование токопроводящей дорожки. Растрескивание и вспучивание покрытия, скорее всего, происходит из-за выделяющихся газообразных продуктов деструкции текстолита. Из этого следует, что при использовании в качестве подложки текстолита или гетинакса различных марок или партий, можно получить отличающиеся результаты по дугостойкости, так как с разной интенсивностью будет происходить деструкция связующих подложки.

На стеклянных пластинках механизм разрушения совершенно другой. Нарастание изменений покрытия во времени видно, но при этом не наблюдается ни растрескивания, ни вспучивания эмали, так как нет деструкции подложки. Только на последней стадии испытания происходит образование токопроводящей дорожки. На металлической пластинке ситуация аналогичная, однако из-за более интенсивного теплоотвода на эмали ДИЭЛ-ЭД-15 за предельное время 420 с токопроводящей дорожки вообще не образуется.

Так как на металлических пластинках возможен электрический пробой эмалевого покрытия необходимо определение оптимальной толщины, при котором вероятность пробоя на металлическую подложку минимальна. Были проведены испытания при различных толщинах эмалевого слоя. Установлено, что при толщине покрытия менее 40 мкм происходит мгновенный пробой и определить время

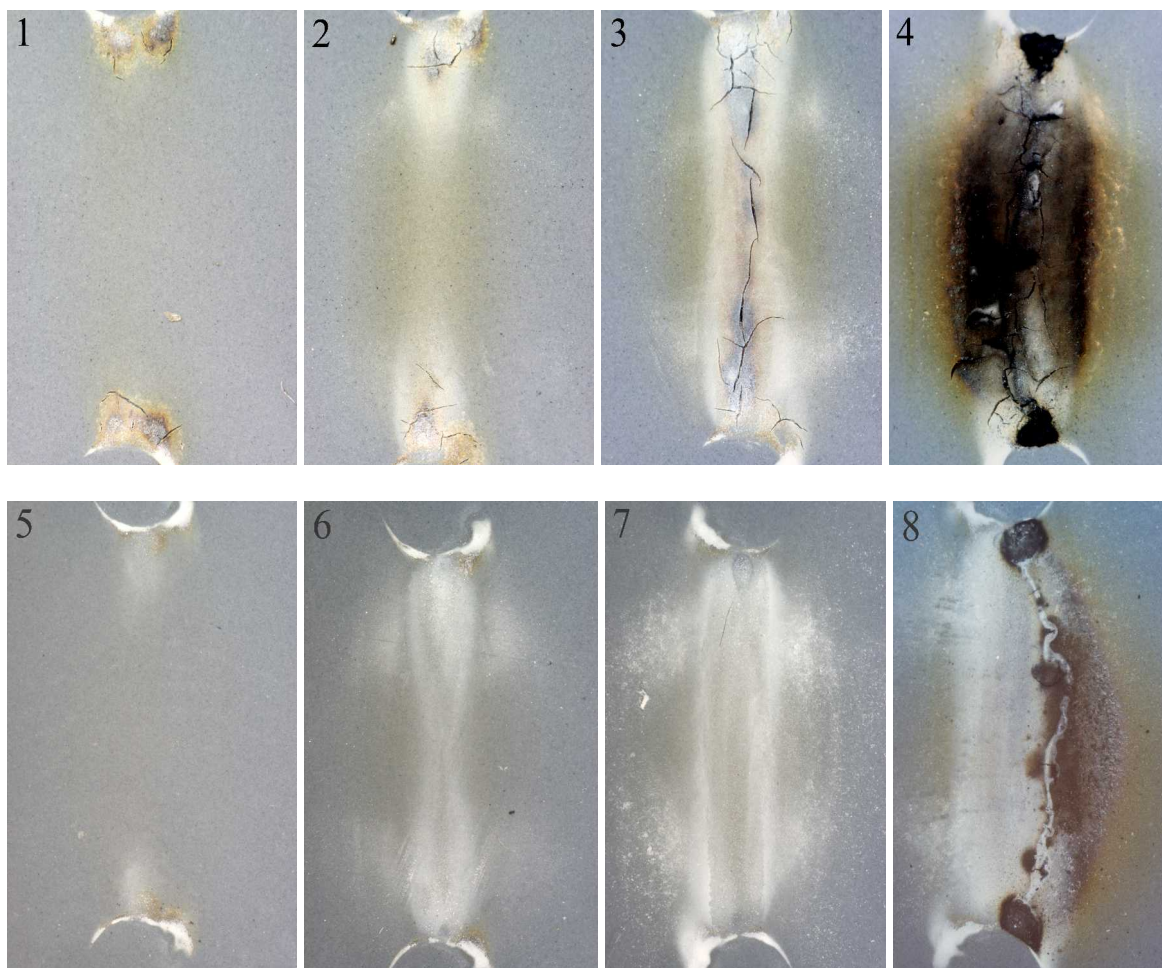


Рисунок 3. Фотографии эмалевых покрытий, нанесенных на текстолитовую (1-4) и стеклянную (5-8) пластинки на различных стадиях испытаний.

дугостойкости не представляется возможным, при толщине 40 – 80 мкм вероятность пробоя очень велика, что вносит серьезную ошибку в результаты измерений. Толщина слоя порядка  $(100\pm 10)$  мкм обеспечивает необходимую электрическую прочность и практически полностью исключает вероятность пробоя на подложку. Кроме того, металлическая подложка позволяет сушить эмали при высокой температуре, что недопустимо для текстолитовых подложек. Исходя из выше сказанного, мы предлагаем при испытаниях на дугостойкость наносить эмали на металлическую подложку. Толщина эмалевого слоя должна составлять  $(100\pm 10)$  мкм. Режим сушки в соответствии с документацией на испытываемую эмаль.

Таким образом, проведенные исследования показали важность четкого соблюдения методик испытаний, а также необходимость внесения изменений в методики в части используемых подложек и толщины покрытий. При сравнении характеристик эмалей по дугостойкости необходимо обращать внимание на то, каким методом проводилось испытание, на каких подложках, а также насколько точно воспроизводились условия проведения испытаний, указанных в технической документации.

#### Литература

1. ГОСТ 9151-75. Эмали марок ГФ-92

2. ГОСТ 10345.1-78. Материалы электроизоляционные твердые. Метод определения стойкости к действию электрической дуги малого тока высокого напряжения.

3. Энциклопедия полимеров, т.3, М., 1977