

Д.А. Минайлов

(Академия ГПС МЧС России: e-mail: minailov-denis@mail.ru)

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ОГНЕЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Приведены результаты исследования возможности применения диэлектрических методов для оценки сохранности огнезащитных свойств полимерных покрытий стальных конструкций во время эксплуатации.

Ключевые слова: стальные конструкции, огнестойкость, огнезащитная эффективность, диэлектрические методы, диэлектрическая ячейка.

D.A. Minaylov

PROBLEMS AND PROSPECTS OF DIELECTRIC METHOD OF CONTROL FLAME RETARDANT RESIN COATING FOR STEEL STRUCTURES

The results of the study the possibility of using the dielectric methods for assessing the safety of fire-retardant properties of polymer coatings to steel structures during the operation.

Key words: steel structures, fire resistance, flame retardant efficiency, methods of dielectric, dielectric cell.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 30 июня 2015 г.

В настоящее время стальные конструкции все чаще применяют в качестве несущих элементов зданий и сооружений различного функционального назначения. Хотя стальные конструкции выполняют из негорючего материала, но фактический предел их огнестойкости при пожаре без огнезащиты, в зависимости от толщины элементов сечения и величины действующих напряжений, составляет от 6 до 25 мин. [1]. Значения требуемых пределов огнестойкости составляют от 15 до 120 мин., в зависимости от степени огнестойкости здания типа конструкций [2]. Такие требования существенно ограничивают область применения незащищенных стальных конструкций в качестве несущих элементов, а огнезащита становится обязательным условием безопасности их применения при повышенных требованиях к огнестойкости.

Наиболее распространенными средствами огнезащиты стальных конструкций являются **тонкослойные полимерные покрытия**, способные увеличиваться многократно при нагревании. **Вспучивающиеся покрытия** представляют собой композиционные материалы, включающие полимерное вяжущее и наполнители (антипирены, газообразователи, жаростойкие вещества и стабилизаторы вспененного угольного слоя). При вспучивании и одновременном обугливание происходит образование мелкоячеистого по структуре слоя, обладающего низкой теплопроводностью, в результате чего резко замедляется прогрев металлических конструкций.

Согласно данным изготовителей огнезащитных покрытий, их гарантийный срок службы составляет не менее 10-30 лет. При этом нормативные сроки службы стальных конструкций, подвергаемых огнезащите, составляют не менее 10-100 лет (табл. 1), а периодичность их капитального ремонта (замены) – 15-80 лет (табл. 2) [3, 4].

**Применение средств огнезащиты стальных конструкций зданий
и сооружений промышленного и гражданского назначения**

Наименование	Нормативные сроки службы стальных конструкций, лет ГОСТ Р 54257-2010				Степень огнестойкости зданий, сооружений	Пределы огнестойкости стальных конструкций, мин.				Необходимость огнезащиты	Приоритетные средства огнезащиты стальных конструкций	Гарантийный срок эксплуатации средства огнезащиты, лет (данные изготовителя средства огнезащиты)
	Временные здания и сооружения	Сооружения, эксплуатируемые в условиях сильноагрессивных сред	Здания и сооружения массового строительства в обычных условиях эксплуатации	Уникальные здания и сооружения		Требуемый по федеральному закону (П _{тр})	Фактический (П _ф)	П _{тр} -П _ф , мин.	% соотношение П _{тр} -П _ф от П _{тр}			
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Несущие конструкции	10	не менее 25	не менее 50	более 100	V	не нормируется			-	-	-	
					IV	R15	R15	0		-*	-	-
					III	R45		30	66,67	+	Тонкослойные покрытия**	10-30
					II	R90		75	83,33			
					I	R120		105	87,5	+	Конструктивная огнезащита	Сравним со сроком эксплуатации конструкции
Конструкции перекрытия междуэтажного, чердачного и над подвалами	10	не менее 25	не менее 50	более 100	V	не нормируется			-	-	-	
					IV	R15	R15	0		-	-	-
					II, III	R45		30	66,67	+	Тонкослойные покрытия	10-30
					I	R60		45	75			

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Конструкции бесчердачных покрытий	10	не менее 25	не менее 50	более 100	V	не нормируется			-	-	-	
					II-IV	R15	R15	0		-	-	-
					I	R30		15	50	+	Тонкослойные покрытия	10-30
Конструкции внутренних стен и лестничных клеток	10	не менее 25	не менее 50	более 100	V	не нормируется			-	-	-	
					IV	R45	R15	30	66,67	+	Тонкослойные покрытия	10-30
					III	R60		45	75	+		
					II	R90		75	83,33	+		
I	R120	105	87,5	+	Конструктивная огнезащита	Сравним со сроком эксплуатации конструкции						
Конструкции маршей и площадок лестниц	10	не менее 25	не менее 50	более 100	V	не нормируется			-	-	-	
					IV	R15	R15	0		-	-	-
					III	R45		30	66,67	+	Тонкослойные покрытия	10-30
					I, II	R60		45	75	+		

* В случаях, когда минимальный требуемый предел огнестойкости конструкции (за исключением конструкции в составе противопожарных преград) указан R15, допускается применять незащищенные стальные конструкции независимо от их фактического предела огнестойкости, за исключением случаев, когда предел огнестойкости несущих элементов здания по результатам испытаний составляет менее R 8.

** В зданиях I и II степеней огнестойкости для обеспечения требуемого предела огнестойкости более R60 несущих элементов здания допускается применять только конструктивную огнезащиту. Применение тонкослойных огнезащитных покрытий стальных несущих конструкций в зданиях I-II степеней огнестойкости возможно при условии применения их для конструкций с приведенной толщиной металла согласно ГОСТ Р 53295-2009 не менее 5,8 мм.

Примерная периодичность капитального ремонта металлических конструктивных элементов промышленных и гражданских зданий

№ п/п	Наименование конструктивных элементов	Примерная периодичность капитального ремонта (замены) в годах для различных условий эксплуатации, лет		
		в нормальных условиях	в агрессивной среде и при переувлажнении	при вибрационных и других динамических нагрузках
Промышленные здания				
1	Колонны	50-60	40-45	40-50
2	Фермы	25-30	15-20	20-25
3	Перекрытия	20-25	15-18	15-20
Жилые здания				
4	Перекрытия по металлическим балкам	80	–	–
5	Площадки и марши лестниц по металлическим балкам и косоурам	60	–	–
Здания и объекты коммунального и социально-культурного назначения				
6	Перекрытия по металлическим балкам	65	–	–
7	Площадки и марши лестниц по металлическим балкам и косоурам	40	–	–

Приведённые данные свидетельствует о том, что сроки эксплуатации или периодичность капитального ремонта стальных конструкций могут превышать гарантийный срок службы примененного тонкослойного покрытия, в связи с чем особую актуальность приобретают вопросы контроля его огнезащитных свойств.

Контроль сохранности огнезащитных свойств покрытий во время эксплуатации производится в соответствии с [5-7]. Согласно этим документам, предварительная оценка сохранности огнезащитных свойств покрытий осуществляется на основе результатов **визуального осмотра** с целью оценки внешнего вида, который должен соответствовать требованиям нормативных документов на применение покрытия. Однако, такая субъективная оценка не всегда является достаточно достоверной. Поэтому при возникновении сомнений в качестве покрытия проводится комплексная проверка, включающая в себя экспресс-методы (приложение Ф ГОСТ Р 12.3.3047-98) и методы термического анализа.

Согласно приложению Ф ГОСТ Р 12.3.3047-98, сохранность огнезащитных свойств вспучивающихся покрытий оценивается экспресс методом по коэффициенту вспучивания, который должен быть не менее 10.

Методы термического анализа являются наиболее точными и информативными. Заключение о сохранности огнезащитной эффективности делается на основе сравнения термоаналитических характеристик и параметров покрытия в начале и во время эксплуатации. В случае частичной (допустимой) потери свойств, расхождение среднеарифметических значений термоаналитических идентификационных параметров не должно превышать 25 %.

Экспериментальные методы позволяют осуществлять оценку сохранности огнезащитных свойств только в лабораторных условиях на отобранных пробах покрытия. Отбор проб проводится в местах конструкций, где по визуальным признакам выявлены изменения внешнего вида покрытия. Как показывает практика, выявить такие места специалистам иногда бывает проблематично из-за большой высоты расположения конструкции, наличия облицовки конструкции, большой площади обработки. Такая ситуация может привести к несвоевременному выявлению мест снижения огнезащитных свойств покрытий, что в случае возникновения пожара приведет к преждевременной утрате несущей способности стальных конструкций.

Решить проблему контроля сохранности огнезащитных свойств покрытия, а также несвоевременного обнаружения мест снижения огнезащитных свойств покрытий на объекте можно применением автоматизированных систем мониторинга технического состояния конструкций зданий и сооружений (рис.1).

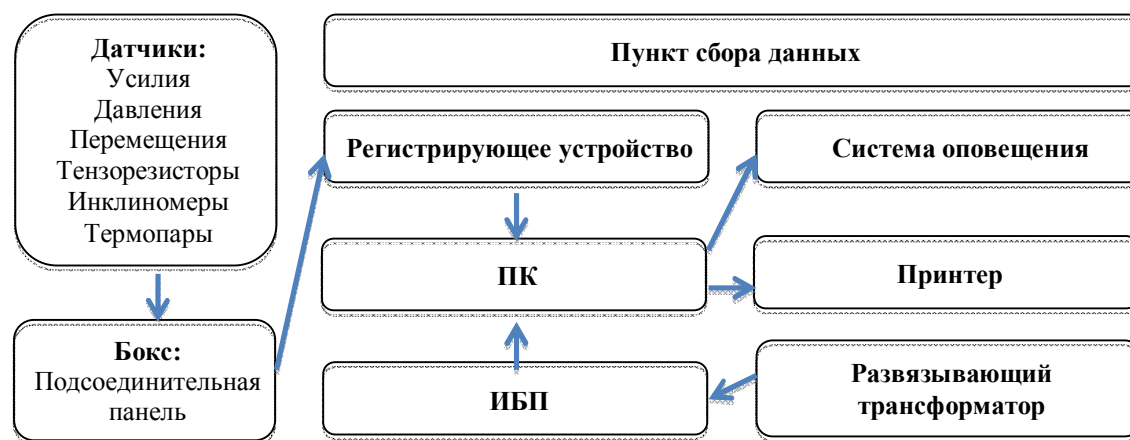


Рис. 1. Блок-схема измерительной системы мониторинга технического состояния конструкций зданий и сооружений

В отличие от планового осмотра, выполняемого специалистами, система мониторинга позволяет производить инструментальный неразрушающий контроль непрерывно с заданным интервалом времени в течение как этапа строительства, так и периода последующей эксплуатации, что позволяет своевременно выявлять дефекты стальных конструкций и тем самым повышать безопасность здания или сооружения во время пожара.

Анализ возможностей систем мониторинга показал, что в настоящее время они не позволяют контролировать сохранность огнезащитных свойств покрытий, в связи с отсутствием необходимых для этой цели датчиков и измерительной аппаратуры. То есть, сложившаяся ситуация требует разработки специального оборудования, важной проблемой при разработке которого является выбор контролируемых параметров, чувствительных к изменениям огнезащитных свойств покрытия и определяемых относительно простыми дистанционными методами.

Согласно [8], механизм огнезащитного действия полимерного покрытия зависит от компонентного состава и физико-химического взаимодействия между компонентами, которое обеспечивает огнезащитную эффективность покрытия при повышенных температурах во время пожара. Под действием внешних факторов в полимерном покрытии происходят физико-химические, биохимические, фотохимические, электрохимические процессы в полимерной матрице с потерей технологических, прочностных, эксплуатационных, адгезионных и огнезащитных характеристик. Анализ применяемых методов исследования физико-химических и механических свойств полимерных материалов показал, что в последние годы для их оценки и контроля широко используются диэлектрические методы.

Благодаря своей высокой чувствительности к составу и состоянию материалов диэлектрические методы находят широкое использование для решения как научных, так и прикладных задач [9]:

- определение диэлектрических свойств материалов и исследования их зависимости от состава, температуры и других факторов;
- исследование кинетики химических и физических превращений материалов и изменения молекулярной подвижности в них.

К параметрам полимерного покрытия, которые дистанционно контролируются с помощью диэлектрических методов, относятся: диэлектрическая проницаемость (ϵ) и тангенс угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$).

Диэлектрическая проницаемость характеризует способность покрытия поляризоваться в электрическом поле. Поляризация – это ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул материала при воздействии на него электрического поля. Диэлектрическая проницаемость ϵ определяется отношением заряда, накопленного в конденсаторе с диэлектриком, к заряду конденсатора при тех же геометрических размерах, если между обкладками находится вакуум:

$$\epsilon_r = \frac{Q}{Q_0} = \frac{CU}{C_0U} = \frac{C}{C_0},$$

- где Q – заряд конденсатора с диэлектриком;
 Q_0 – заряд конденсатора с диэлектриком (вакуум);
 U – напряжение;
 C – ёмкость конденсатора с диэлектриком;
 C_0 – ёмкость конденсатора с диэлектриком (вакуум).

Диэлектрическая проницаемость является важнейшим макроскопическим параметром материала, характеризующим процесс поляризации, и она может быть найдена по измеренной ёмкости конденсатора с диэлектриком.

В материалах всегда содержится небольшое количество свободных зарядов, которые под воздействием электрического поля создают слабые по величине сквозные токи (или – токи утечки). Протекание токов проводимости сквозь толщу диэлектрика и по его поверхности сопровождается рассеянием энергии и выделением тепла. Для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле используют угол диэлектрических потерь и тангенс этого угла ($\operatorname{tg} \delta$).

Угол диэлектрических потерь называется угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз между током и напряжением в ёмкостной цепи. В случае идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи будет опережать вектор напряжения на 90° , при этом угол δ будет равен 0° . Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ и его тангенс (рис. 2).

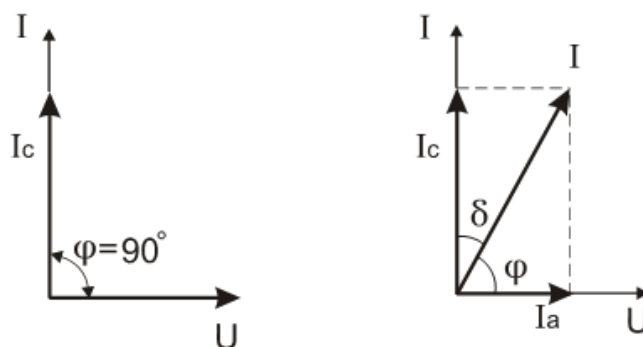


Рис. 2. Угол диэлектрических потерь

Тангенс угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$) – это отношение активной и реактивной составляющих тока, возникающих под действием переменного (синусоидального) напряжения, приложенного к диэлектрику. Тангенс угла потерь показывает, какую часть от реактивной мощности составляет мощность активных потерь:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c}.$$

Диэлектрические потери в электроизоляционном материале, работающем под переменным напряжением, пропорциональны квадрату напряжения, угловой частоте, ёмкости изоляции, тангенсу угла диэлектрических потерь и подсчитываются по формуле:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta,$$

где P_a – мощность, теряемая в диэлектрике, Вт;

U – напряжение, В;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота (f – частота напряжения), Гц;

C – ёмкость, Ф;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Так как величины U , ω , C практически являются неизменными, то о потерях энергии в изоляции судят по величине тангенса угла диэлектрических потерь, которым обладает данный диэлектрик. $\operatorname{tg} \delta$ может характеризовать не только конкретный материал, но и изоляционную конструкцию машины, аппарата или прибора в целом.

Для большинства полимерных материалов характерна ярко выраженная связь диэлектрических свойств с молекулярным тепловым движением, что обуславливает широкие возможности диэлектрических методов в изучении структуры и состава материалов, химических и физических превращений в них.

Учитывая вышеописанное, необходимо провести работу по оценке возможности применения диэлектрических методов для контроля сохранности огнезащитных свойств полимерных покрытий. Для этого необходимо:

- обосновать и выбрать метод контроля диэлектрических свойств огнезащитных покрытий;
- исследовать возможности выбранного метода для оценки физико-химических превращений в огнезащитном покрытии под воздействием внешних факторов;
- разработать и опробовать датчики для контроля диэлектрических свойств в процессе проведения эксперимента;
- организовать и провести натурный эксперимент с целью установления закономерностей изменений диэлектрических и огнезащитных свойств покрытий в процессе эксплуатации.

Чтобы получить полную характеристику диэлектрических свойств материала и выявить его структуру и состояние, необходимо проводить испытания в широком диапазоне частот (от 10^{-5} до 10^{13} Гц). Такой широкий частотный диапазон нельзя охватить единым методом измерений, поэтому в каждом поддиапазоне частот существует свой предпочтительный метод:

- мостовые измерительные схемы ($0-10^6$ Гц);
- схемы с колебательными контурами (10^2-10^8 Гц);
- коаксиальные линии (10^8-10^{12} Гц);
- полостные резонаторы ($10^{10}-10^{14}$ Гц).

Измерение диэлектрических свойств материалов в непрерывном частотном диапазоне проводят обычно в научно-исследовательских целях, а для оценки и контроля качества материалов измерения проводят, чаще всего, на некоторых стандартных частотах.

В условиях большого выбора приборов для диэлектрических измерений важнейшее значение приобретают конструкция и способ изготовления электродов и диэлектрических ячеек, которые непосредственно контактируют с исследуемым материалом. В литературе описано большое число конструкций диэлектрических ячеек и датчиков для решения широкого круга задач, однако готовых ячеек для дистанционного контроля диэлектрических свойств огнезащитных покрытий нет.

На первом этапе исследований была разработана и изготовлена диэлектрическая ячейка в виде плоскопараллельного конденсатора, между обкладками которого находится полимерное покрытие (рис. 3).

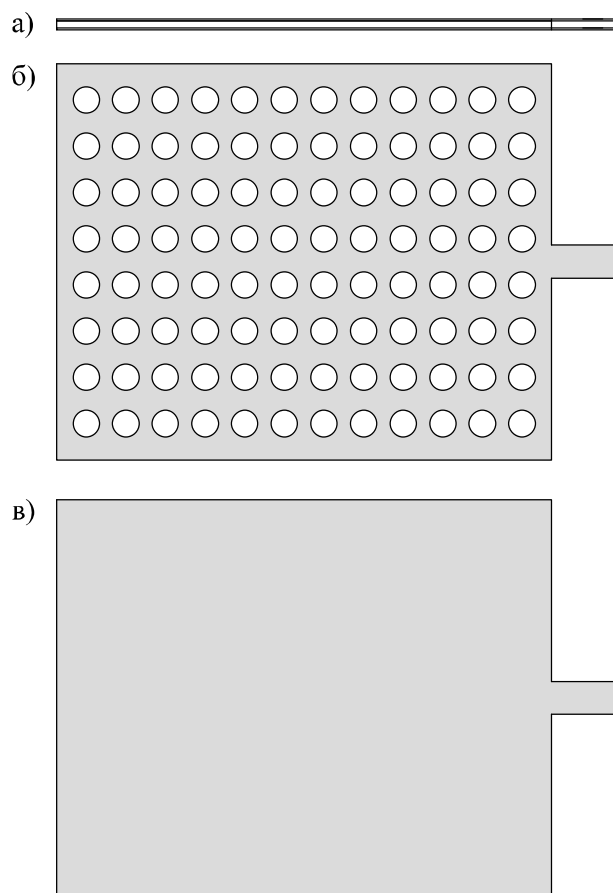


Рис. 3. Схема диэлектрической ячейки:
 а) ячейка с образцом исследуемого материала (вид сбоку);
 б) верхняя перфорированная обкладка конденсатора;
 в) нижняя непорфорированная обкладка конденсатора

Ячейка состоит из двух алюминиевых плоскопараллельных пластин (электродов) размером 60×75 мм толщиной 0,45 мм. Один из электродов перфорирован отверстиями диаметром 4 мм. В качестве объекта исследований использовалась огнезащитная краска "Терма". Краску наносили на непорфорированную пластину, а затем на неё укладывали перфорированный электрод, и вся композиция отверждалась при температуре 25 ± 2 °С. Затем к электродам припаивались проводники, которые соединялись с измерительным прибором.

В качестве измерительного прибора использовался измеритель иммитанса (RLC-метр) Mastech MS5308, в основе которого лежит мост переменного тока. Ячейка с исследуемым материалом подключалась к прибору, что позволило получать значения ёмкости (C) и тангенса угла потерь $\text{tg} \delta$.

Замеры производились на частотах 100, 120, 1000, 10000, 100000 Гц при температуре 26 °С и относительной влажности 45 % в течение недели ежедневно по 30 мин. с интервалом 1 мин. Полученные массивы значений C_x и $\text{tg} \delta_x$ обрабатывали, определяя среднеквадратичное отклонение и границы доверительного интервала. Были также рассчитаны среднеквадратичные отклонения показаний датчика для 30 измерений в течение суток. По результатам замеров

показаний диэлектрической ячейки в течение недели были рассчитаны случайные погрешности среднего значения по критерию Стьюдента. Установлено, что с уменьшением частоты случайные погрешности для C увеличиваются и достигают максимального значения 2,04 % на частоте 100 Гц, а для $\text{tg } \delta$ уменьшаются и достигают максимального значения 1,53 % на частоте 100 кГц. Полученные значения погрешностей определения диэлектрических показателей вполне допустимы, так как при их контроле обычно важны не абсолютные значения C и $\text{tg } \delta$, а их изменения в процессе эксплуатации огнезащитного материала.

Из приведенных выше данных видно, что перфорированную диэлектрическую ячейку в виде плоскопараллельного конденсатора можно применять для контроля диэлектрических свойств огнезащитных покрытий, а также использовать для дальнейших исследований.

Литература

1. **Ройтман В.М., Серков Б.Б., Шевкуненко Ю.Г. и др.** Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: учебник. М.: Академия ГПС МЧС России. 2013. 364 с.
2. **Федер.** закон Рос. Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".
3. **Постановление** Госстроя СССР от 29 декабря 1973 г. № 279 "Об утверждении Положения о проведении планово-предупредительного ремонта производственных зданий и сооружений".
4. **ВСН 58-88(р).** Положение об организации и проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания зданий, объектов коммунального и социально-культурного назначения.
5. **Оценка** качества огнезащиты и установление вида огнезащитных покрытий на объектах: руководство. М.: ВНИИПО МЧС России, 2011. 39 с.
6. **Оценка** огнезащитных свойств покрытий в зависимости от сроков их эксплуатации: методика. М.: ВНИИП МЧС России, 2014. 31 с.
7. **Оценка** допустимого срока эксплуатации тонкослойных огнезащитных покрытий в различных климатических условиях: методика. М.: ВНИИПО МЧС России, 2014. 40 с.
8. **Андронов В.А., Данченко Ю.М., Бухман О.М.** Подходы к определению сроков службы огнезащитных полимерных покрытий // Сборник научных трудов. 2012. Вып. 31. С. 10-18.
9. **Чурило И.В.** Методы дистанционного контроля и изменение диэлектрических свойств эпоксидных полимерных материалов на их основе при длительном воздействии факторов космического пространства: дис. ... канд. техн. наук. М.: Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского, 2003. 147 с.