

УДК 620.179.1.082.705
DOI

ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ



В. А. Сясько,
д-р техн. наук,
ООО «Константа»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: 9334343@gmail.com



С. С. Голубев,
канд. техн. наук,
Федеральное агентство по
техническому
регулированию и
метрологии «Росстандарт»,
Москва, Россия.
E-mail: golubev@gost.ru



А. С. Мусихин,
ООО «Константа»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: musihinaleksei@
mail.ru

Применительно к импульсному высоковольтному контролю подробно рассмотрен электрический механизм пробоя диэлектриков на основе квантово-механических представлений, условия его возникновения и приведены основные полученные соотношения для расчета электрической прочности E_s и пробивного напряжения U_s для защитных диэлектрических покрытий. Приведены сравнительные результаты экспериментального исследования предложенных алгоритмов расчета E_s и U_s , а также методик выявления (допускового контроля) участков лакокрасочных покрытий с недопустимой минимальной толщиной и пузырями покрытий. Применение предлагаемых алгоритмов и методик позволит проводить стопроцентный контроль сплошности и недопустимых утонений лакокрасочных и подобных им диэлектрических защитных покрытий наружных и внутренних поверхностей трубопроводов, а также различных крупногабаритных ответственных изделий.

Ключевые слова: электроискровой метод, сплошность, покрытие, толщина, электрическая прочность, пробивное напряжение.

V. A. Syasko
(Constanta LTD, St. Petersburg, Russia);
S. S. Golubev
(Federal Agency on Technical Regulating and Metrology
ROSSTANDART, Moscow, Russia);
A. S. Musikhin
(Constanta LTD, St. Petersburg, Russia)

THE HIGH VOLTAGE TESTING OF DIELECTRIC COATINGS THICKNESS

The technology of applying many coatings (including paints and varnishes) involves the layering of visually indistinguishable layers that make up the coating system. However, in case of application technology violation, the number of coating layers (thickness) may not correspond to the declared. Thus, in a number of cases, it is necessary to control the number of layers of the final coating system.

One of the most common methods for monitoring the continuity of coatings is the high voltages spark method of non-destructive testing. The method involves the application of a high voltage U between the electrode installed on the surface of the coating and the conductive substrate. The revealing of defect coating area provide by registering the coating breakdown. The analysis shows that the development of methods for detecting not only discontinuities, but also unacceptable thinning of dielectric coatings due to their spark breakdown, seems to be a promising direction in the development of high voltages spark testing.

In relation to pulsed high voltages spark testing, the electrical mechanism of the breakdown of dielectrics based on quantum-mechanical concepts, the conditions of its occurrence, and the main relations obtained for calculating the electric strength E_s and breakdown voltage U_s for protective dielectric coatings are considered in detail. Comparative results of an experimental study of the proposed algorithms for calculating E_s and U_s , as well as methods for identifying (tolerance control) sections of paint coatings with an unacceptable minimum thickness and coating bubbles, are presented. The application of the proposed algorithms and methods will allow one hundred percent control of the continuity and unacceptable thinning of paint and varnish and similar dielectric protective coatings of the external and internal surfaces of pipelines, as well as various large area facilities.

Keywords: high voltage method, continuity, coating, thickness, electrical strength, breakdown voltage.



Статья поступила в редакцию 04.05.2020

Received 04.05.2020

В настоящее время различные системы защитных диэлектрических покрытий широко применяются для придания поверхностям изделий антикоррозионных, гидроизоляционных и других свойств. При этом технология нанесения многих покрытий (в частности, лакокрасочных покрытий – ЛКП) предполагает послойное нанесение визуально неразличимых слоев, составляющих систему покрытия. Однако при нарушении технологии нанесения количество слоев покрытия может не соответствовать заявленному. Таким образом, в ряде случаев можно говорить о том, что требуется проводить контроль количества слоев конечной системы [1, 2].

Как правило, количество слоев системы покрытия определяется по конечной толщине покрытия приборами, осуществляющими дискретные измерения толщины в различных точках покрытия [3], а сплошной контроль толщины покрытия является нетривиальной технической задачей.

В свою очередь к большей части современных диэлектрических покрытий также предъявляются требования к отсутствию дефектов сплошности всей их поверхности. Дефекты сплошности покрытия могут возникать в процессе нанесения и эксплуатации защитных покрытий (например, воздушные пузыри, поры, трещины, недопустимые утонения и т.д.). Одним из наиболее распространенных методов контроля сплошности покрытий является электроискровой метод *неразрушающего контроля* (НК), предполагающий приложение высоковольтного контрольного напряжения U между электродом, устанавливаемым на поверхность покрытия, и проводящим основанием (подложкой) и образование искрового пробоя дефектных участков покрытия (например, воздушных промежутков в местах нарушения сплошности). Протекающий при искровом пробое электрический ток I регистрируется прибором со звуковой и световой сигнализацией (рис. 1).

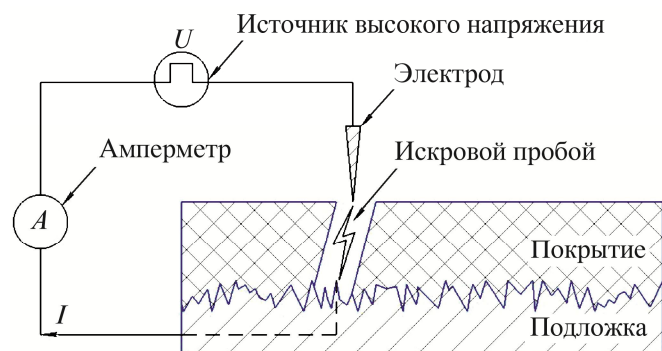


Рис. 1. Принцип действия электроискрового метода НК

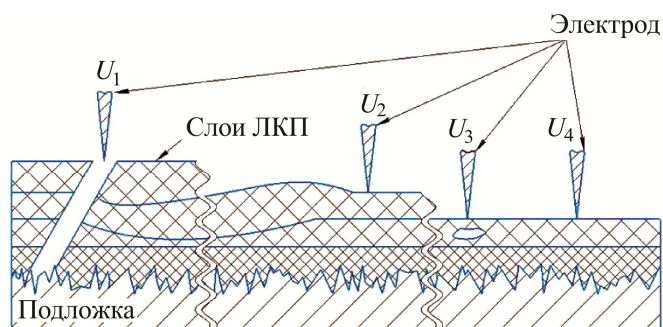


Рис. 2. Схематическое изображение процесса выявления дефектов сплошности и толщины покрытия электроискровым методом:

U_1 – контрольное напряжение для четырех слоев ЛКП; U_2 – пробивное напряжение трех слоев ЛКП; U_3 – пробивное напряжение несквозного дефекта (внутреннего пузыря) ЛКП; U_4 – пробивное напряжение для одного слоя ЛКП

Современные методики выбора контрольного напряжения U_1 , отраженные в отечественных и зарубежных стандартах, позволяют выявлять только сквозные дефекты покрытий (рис. 2). При этом методики не уделяют внимания связи пробивного напряжения с толщиной контролируемых покрытий U_2 и, как следствие, пробивному напряжению покрытий с недопустимо малой толщиной U_4 и несквозных дефектов покрытий U_3 .

Перспективным направлением развития электроискрового контроля представляется разработка методик выявления не только нарушений сплошности покрытий, но также их недопустимых утонений и внутренних пузырей по возникновению искрового пробоя воздушного промежутка [4], диэлектрического покрытия или диэлектрического покрытия с воздушным промежутком соответственно.

Механизмы возникновения искрового пробоя твердых диэлектриков

В процессе развития электроискровой пробой твердых диэлектриков проходит как минимум две стадии: стадию потери электрической прочности и стадию разрушения диэлектрика. Применительно к электроискровому контролю с учетом процессов, определяющих развитие подготовительной стадии, выделяются три основные формы пробоя твердых диэлектриков: тепловой, электрохимический и электрический.

Электрический пробой, как правило, наблюдается в том случае, когда не соблюдены условия развития теплового пробоя, а длительность воздействия приложенного напряжения $U_1...U_4$ крайне мала (электрический пробой развивается за время

<1 мкс). Возникновение электрического пробоя обуславливают электронные процессы, происходящие в сильном электрическом поле и приводящие к лавинообразному увеличению концентрации носителей в диэлектрике. Электрическая форма пробоя проявляет слабую зависимость пробивной напряженности электрического поля от времени приложения напряжения и температуры.

Тепловой пробой обусловлен прогрессивно нарастающим выделением тепла в диэлектрике за счет диэлектрических потерь. При постоянном приложенном напряжении диэлектрические потери определяются удельной проводимостью диэлектрика γ , а при переменном – тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}(\delta)$, где δ – угол диэлектрических потерь. Так как с увеличением температуры начинает увеличиваться γ , а в области повышенных температур также увеличивается $\operatorname{tg}(\delta)$, то при некотором напряжении возможно возникновение неустойчивого теплового состояния диэлектрика, что в свою очередь приводит к увеличению потерь в диэлектрике и к дальнейшему росту температуры, заканчивающемуся тепловым разрушением диэлектрика. Типичным признаком тепловой формы пробоя является экспоненциальное уменьшение пробивного напряжения с ростом температуры.

Электрохимическая форма пробоя (электрическое старение) проявляется как сравнительно медленное изменение структуры твердого диэлектрика и его химического состава. Такая форма пробоя развивается под действием электрического поля или разрядов в окружающей среде, при этом значение напряжения, прикладываемого к диэлектрику, и напряженность электрического поля в нем существенно меньше значений аналогичных параметров при электрическом и тепловом пробоях [5].

В рамках применения электроискрового метода для выявления недопустимых утонений покрытия и воздушных пузырей наибольший интерес представляет электрический механизм пробоя диэлектрических покрытий. Длительность процессов, приводящих к электрическому пробоя, не превышает 500 нс [6], что позволит проводить электроискровой контроль с высокой скоростью.

Пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$ большинства твердых и газообразных диэлектриков при толщинах покрытий $h > 50$ мкм обратно пропорционально h :

$$U_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{пр}}}{h},$$

где $E_{\text{пр}}$ – электрическая прочность покрытия, кВ/мм.

Таким образом, зная значение $E_{\text{пр}}$ контролируемого покрытия, можно рассчитать пробивное

напряжение в районе несквозного дефекта или недопустимого утонения покрытия. Значение $E_{\text{пр}}$ может быть определено расчетным путем или экспериментально.

Расчетное определение электрической прочности твердых диэлектриков

В настоящее время большинство исследователей придерживается теории, согласно которой электрический пробой твердых диэлектриков обусловлен ударной ионизацией электронами.

Опираясь на квантово-механические представления, можно утверждать, что в сильных электрических полях в зоне проводимости у диэлектриков существуют свободные электроны с определенной энергией. Эти электроны при своем движении могут осуществлять ударную ионизацию, участвовать в неионизационных столкновениях, приводя к образованию возбужденных атомов и молекул, рекомбинировать и испытывать рассеивание (торможение) на дефектах структуры и тепловых колебаниях атомов и ионов [7].

Рассмотрим условия, приводящие к существенному увеличению концентрации электронов в зоне проводимости диэлектрика, и сам акт ударной ионизации. Согласно зонной теории электрон, находящийся в зоне проводимости, получает за единицу времени некоторую энергию A от электрического поля, но, с другой стороны, тратит энергию B на столкновения с колебаниями атомов диэлектрика (энергия передается диэлектрику в виде теплоты). Если обеспечены условия, при которых $A > B$, то электрон, разгоняясь в электрическом поле, непрерывно увеличивает свою энергию $\Delta\xi$ относительно дна зоны проводимости. Как только $\Delta\xi$ становится больше энергии ионизации, равной ширине запрещенной зоны диэлектрика, то этот электрон с некоторой вероятностью может передать энергию другому электрону, относящемуся к валентной (заполненной) зоне, переводя его при этом в зону проводимости. Таким образом, происходит увеличение концентрации электронов в зоне проводимости.

При этом, если в газе ускоряемый электрон расходует свою энергию до ионизации на возбуждение газовых молекул или атомов, то в твердом диэлектрике вследствие большой плотности атомов (ионов) электрон расходует свою энергию в основном в результате взаимодействия с колебаниями атомов структуры диэлектрика. При этом диэлектрик может иметь как кристаллическую, так и аморфную или другую неупорядоченную структуру.

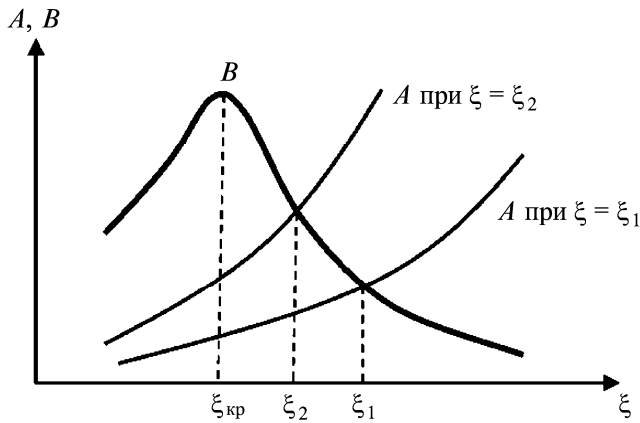


Рис. 3. Зависимость приобретаемой A и теряемой B энергии электроном от его энергии ξ

На рис. 3 схематично показана зависимость потерь энергии электрона B на колебаниях атомов решетки за 1 с от энергии ξ самого электрона. Как видно из рис. 3, энергия B , теряемая электроном при взаимодействии с колебаниями атомов решетки, зависит от энергии электрона ξ и изменяется по кривой, имеющей некий максимум.

При малой энергии электрона ξ малы и потери энергии B . При некоторой энергии электрона $\xi_{кр} = 0,1 \dots 0,2$ эВ потери энергии становятся максимальными. При большой энергии электрона потери становятся малыми из-за уменьшения времени взаимодействия электрона с колебаниями атома решетки. Если напряженность электрического поля достаточна для того, чтобы электроны достигли энергии $\xi_{кр}$, соответствующей максимуму потерь, то дальше электроны будут ускоряться и достигнут энергии ионизации независимо от ее величины. Эту напряженность поля можно отождествлять с электрической прочностью $E_{пр}$. Таким образом, величина $E_{пр}$ может быть определена из условия $A = B$ при $\xi \geq \xi_{кр}$.

В работе [8] предложена методика расчета $E_{пр}$ для широкого круга электроизоляционных материалов, основанная на условии выполнения критерия $A = B$, при этом

$$E_{пр} = KK_B (A_c^0)^{1,1} \exp\left(\frac{a}{b + \lg(b)} + \frac{m}{n + \lg(\tau)}\right),$$

где K – коэффициент пропорциональности, зависящий от толщины d диэлектрика; K_B – вероятность пробоя; τ – длительность воздействия приложенного напряжения; A_c^0 – энергия каналаобразования; a, b, n, m – некоторые постоянные.

Полученная формула достаточно универсальна и может применяться при расчетах для различных

электроизоляционных материалов толщиной от 0,01 до 40 мм при длительности импульса приложенного напряжения $\tau_{имп} = 0,1 \dots 10,0$ мкс. В упрощенном виде она может быть записана так:

$$E_{пр} = 80K_B (A_c^0)^{1,1}.$$

Здесь

$$A_c^0 = A_c \frac{\gamma}{M} = 1,08W_c \frac{\gamma}{M},$$

где

$$A_c = W_c + B_c = 1,08W_c,$$

а W_c в свою очередь определяется выражением

$$W_c = \sum_{i=1}^n n_i D_i + mJ,$$

где γ – плотность; M – молекулярная масса; $n_i D_i$ – энергия диссоциации связей; mJ – энергия ионизации атомов.

В таблице приведены значения $E_{пр}$ для ряда твердых диэлектриков [7], полученные экспериментально и вычисленные по приведенным формулам для образцов толщиной $d = 0,1$ мм.

Определение $E_{пр}$ по приведенной зависимости применимо для однокомпонентных одно- или многослойных покрытий, параметры которых возможно найти в справочной литературе. Вместе с тем следует учесть, что требуемые параметры многокомпонентных покрытий (например, лакокрасочных), как правило, не нормируются. Поэтому $E_{пр}$ многокомпонентных покрытий или покрытий, $E_{пр}$ которых не удастся определить расчетным путем, можно определить экспериментально.

Для экспериментального определения $E_{пр}$ требуется образец покрытия, идентичный контролируемому по составу и толщине d . С использованием этого образца путем приложения высокого контрольного напряжения к образцу определяется пробивное напряжение $U_{пр}$ и рассчитывается $E_{пр}$.

Расчетные и экспериментальные значения электрической прочности $E_{пр}$ для ряда диэлектрических материалов толщиной $d = 0,1$ мм

Диэлектрик	$E_{пр}$, кВ/мм	
	Эксперимент	Расчет
Полиэтилен	67,5...70,0	62
Полистирол	55...73	43
Фторопласт-4	35	40
Кварц кристаллический	67	67
Тальк	32	37
Слюда мусковит	80...110	88

Экспериментальное исследование возможности контроля недопустимых утонений лакокрасочного покрытия по его пробивному напряжению

Возможность выявления недопустимых утонений и пузырей покрытия подтверждают данные эксперимента по определению пробивного напряжения ЛКП. В ходе эксперимента для нанесения покрытий использовалась эмаль ПФ-115, а в качестве подложки контрольного образца – лист фольгированного текстолита со слоем медной фольги толщиной 70 мкм. На различные области подложки были нанесены один, два и три слоя эмали (ЛКП). Пробивное напряжение определяли на 11 участках каждого из одно-, двух- и трехслойных покрытий (рис. 4).

Толщину покрытия h каждого из участков рассчитывали как среднее арифметическое значение пяти измерений, осуществленных электромагнитным толщиномером. Зависимость $U_{пр}$ от среднего значения h для исследованных областей покрытия приведена на рис. 5.

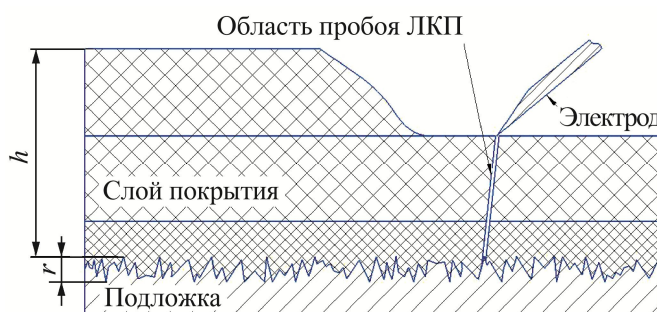


Рис. 4. Многослойные покрытия контрольного образца и схема процесса определения пробивного напряжения: r – шероховатость покрытия

Из рис. 5 видно, что $U_{пр}$ квазилинейно возрастает с увеличением h в соответствии с $E_{пр}$ покрытия. Различия в значениях $U_{пр}$ для близких толщин покрытий могут объясняться некоторым отличием толщины h_i в точке пробоя от среднего значения h контролируемого участка.

Эксперимент показывает, что при выборе соответствующего расчетного или экспериментально определенного значения $U_{пр}$ возможно выявление участков покрытия с недопустимой минимальной толщиной (проведение допускового контроля) и пузырей покрытий.

Заключение

В результате проведенного теоретического и экспериментального анализа электроискрового метода контроля диэлектрических покрытий показано, что возможно расширение области его применения – не только контроль сплошности покрытий, но и выявление мест недопустимого утонения или пузырей покрытий, а также разработки методик расчета или экспериментального определения соответствующих значений импульсного контрольного напряжения, что в отличие от электромагнитных методов контроля толщины позволит проводить стопроцентный контроль сплошности и недопустимых утонений лакокрасочных и подобных им диэлектрических защитных покрытий.

Библиографический список

- ГОСТ 9.032–74. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Группы, технические требования и обозначения. М.: Изд-во стандартов, 1989. 19 с.
- ГОСТ 9.407–2015. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида. М.: Изд-во стандартов, 2016. 58 с.

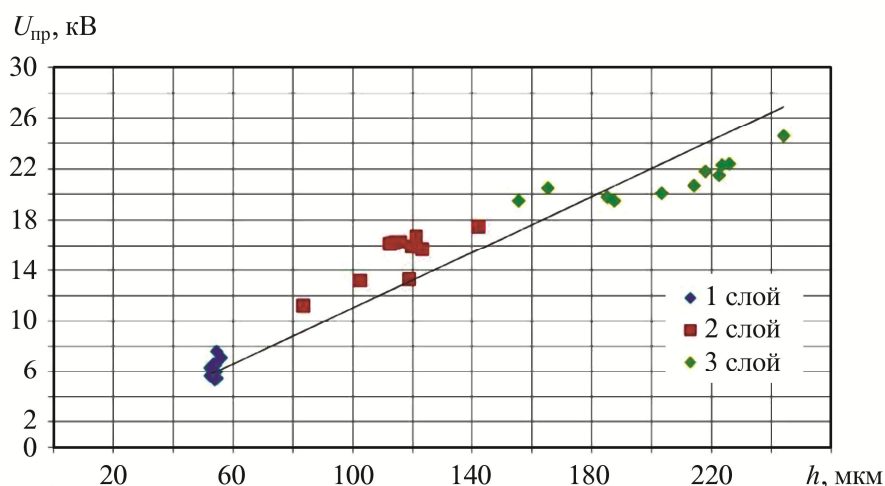


Рис. 5. Зависимость пробивного напряжения покрытия $U_{пр}$ от толщины покрытия h

3. **ГОСТ 31993–2013.** Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия. М.: Изд-во стандартов, 2016. 24 с.

4. **Сясько В. А., Голубев С. С., Мусихин А. С.** Совершенствование электроискрового метода неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2019. № 12. С. 4 – 14.

5. **Сажин Б. И.** Электрические свойства полимеров. 2-е изд. Л.: Химия, 1977. 192 с.

6. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда: учеб. руководство. 2-е изд. М.: Наука, 1992. 536 с.

7. **Воробьев Г. А., Похолков Ю. П., Королев Ю. Д., Меркулов В. И.** Физика диэлектриков (область сильных полей): учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. 244 с.

8. **Вершинин Ю. Н.** Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: Ин-т электрофизики УрО РАН, 2000. 260 с.

Библиографический список

1. **ГОСТ 9.032–74.** Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Группы,

технические требования и обозначения. М.: Изд-во стандартов, 1989. 19 с.

2. **ГОСТ 9.407–2015.** Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида. М.: Изд-во стандартов, 2016. 58 с.

3. **ГОСТ 31993–2013.** Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия. М.: Изд-во стандартов, 2016. 24 с.

4. **Сясько В. А., Голубев С. С., Мусихин А. С.** Совершенствование электроискрового метода неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2019. № 12. С. 4 – 14.

5. **Сажин Б. И.** Электрические свойства полимеров. 2-е изд. Л.: Химия, 1977. 192 с.

6. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда: учеб. руководство. 2-е изд. М.: Наука, 1992. 536 с.

7. **Воробьев Г. А., Похолков Ю. П., Королев Ю. Д., Меркулов В. И.** Физика диэлектриков (область сильных полей): учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. 244 с.

8. **Вершинин Ю. Н.** Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: Ин-т электрофизики УрО РАН, 2000. 260 с.

Для цитирования статьи:

Сясько В. А., Голубев С. С., Мусихин А. С. Электроискровой контроль толщины диэлектрических покрытий // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 9. С. 12 – 17.