



# Электроискровой контроль сплошности защитных лакокрасочных покрытий

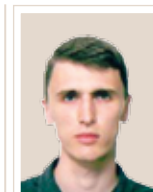
Submitted 03.04.18  
Accepted 15.06.18

Рассмотрены вопросы электроискрового контроля сплошности лакокрасочных покрытий металлических изделий. Приведен анализ дефектов покрытий, снижающих их защитные свойства и обоснована возможность применения электроискрового метода неразрушающего контроля для их выявления. Дан обзор отечественных и импортных электроискровых дефектоскопов и показаны преимущества приборов, реализующих импульсный метод контроля.

Сотрудники ООО «Константа»,  
Санкт-Петербург

**МУСИХИН  
Алексей Сергеевич**

Инженер



**СЯСЬКО  
Владимир  
Александрович**

Генеральный директор,  
д. т. н. Профессор кафедры  
«Приборостроение» Наци-  
онального минерального  
университета «Горный».



Научные интересы:  
контроль физико-меха-  
нических характеристик  
микро- и наноструктури-  
рованных материалов

A. S. Musikhin<sup>1</sup>, V. A. Syasko<sup>1</sup>

## High-Voltage Spark Testing of Protective Refinish Coatings Continuity

Testing of protective refinish coatings (PRC) continuity for metal products and structures is relevant for modern industry. The article gives a detailed analysis of technological and operational PRC defects. Regulated by modern domestic and foreign regulatory documentation methods for monitoring the continuity of dielectric coatings are considered. The possibility of applying high-voltage spark testing to control protective refinish coatings continuity of metal products without disrupting their properties is substantiated. Based on these studies, an interstate standard has been developed. The standard regulates the application of high-voltage spark testing of protective refinish coatings continuity method and gives recommendations on the choice of control voltage and the NDT procedure

*Keywords: refinish coating, continuity, holiday detector*

### Введение

Под действием агрессивных веществ, в том числе атмосферы, изделия из металлов корродируют, что с течением времени может привести к их выходу из строя. Для защиты металлической поверхности существуют разные методы, одним из которых является нанесение лакокрасочных покрытий (ЛКП) [1].

При соблюдении технологии нанесения за счёт высокой адгезии с металлической поверхностью ЛКП образует прочную плёнку, препятствующую химическому взаимодействию металла и агрессивной среды. Однако в процессе нанесения ЛКП и эксплуатации изделий могут возникать ряд дефектов, снижающих эффективность защиты.

### Виды дефектов ЛКП

Особый интерес представляют дефекты, ухудшающие антикоррозионные свойства покрытия и нарушающие его сплошность. Дефекты разделяют на технологические:

- полости;
- поры;
- кратеры;
- непрокрасы;
- трещины;
- недопустимые утонения;
- инородные включения;
- фальсификаты;
- эксплуатационные:
- сколы;
- недопустимые утонения;
- прочие механические повреждения.

Основными источниками дефектов ЛКП являются плохо подготовленная поверхность, нарушения технологии нанесения и недостаток общей культуры производства. Например, если плохо обработать и не обезжирить металлическую поверхность перед нанесением ЛКП, то неизбежно появление недопустимых утонений (толщина покрытия  $h$  меньше допустимого значения  $h_{доп}$ ) и непрокрасов, вызванных наличием окалины или не полностью обезжиренной поверхностью (рис. 1).

Воздух, захваченный покрытием во время его нанесения, при выходе может образовывать пустоты, поры и кратеры (рис. 2).

В результате чрезмерного нанесения краски на поверхность возникают потёки, что может привести к растрескиванию покрытия при высыхании. Нанесение недостаточного количества краски приведёт к появлению недопустимых утонений. Также при использовании некачественных покрытий (фальсификатов) и нарушении культуры производства могут ухудшаться специальные параметры покрытия, например электрическая прочность  $E$ , которая может быть меньше допустимого значения  $E_{доп}$  (рис. 3).

В процессе эксплуатации покрытие подвергается механическим воздействиям, в результате которых могут возникать трещины, сколы и прочие механические повреждения (рис. 4). Агрессивная для ЛКП среда, вступая во взаимодействие с компонентами ЛКП, может вызывать отслаивание,

<sup>1</sup> CONSTANTA Ltd, St. Petersburg, Russia; 9334343@gmail.com; musihinaleksei@mail.ru

деформацию, ухудшение специальных параметров покрытия.

Все упомянутые дефекты нарушают сплошность покрытия. Визуальная оценка сплошности покрытия на большой площади практически невыполнима, поэтому используются различные методы НК сплошности ЛКП.

**Методы контроля сплошности ЛКП**

Рядом отечественных и зарубежных стандартов [3–6] рекомендуется проводить контроль сплошности ЛКП электро-

литическим методом («метод мокрой губки», ЭЛМ) и электроискровым методом (контроль высоким напряжением, ЭИМ).

Принцип действия электролитического метода (рис. 5) основан на возникновении электрического контакта в случае нарушения сплошности покрытия между губкой и проводящим основанием. Контакт обеспечивается жидким электролитом с высокими смачивающими свойствами, которым пропитана губка, проникающим к проводящему ос-

нованию через дефекты покрытия и вызывающим протекание тока  $I$  по цепи.

Основными недостатками ЭЛМ являются:

- низкая скорость контроля — губку надо постоянно смачивать и протирать поверхность покрытия после обнаружения каждого дефекта;
- нечувствительность к дефектам типа недопустимые утонения и инородные включения.

Электроискровой метод (рис. 6) основан на возникновении искрового пробоя дефектных участков ЛКП. При этом электрод и защищаемый объект подключены к полюсам высокого напряжения  $U$  непосредственно через грунт или при помощи заземления. Протекающий при искровом пробое электрический ток  $I$  регистрируется прибором, который, в свою очередь, информирует пользователя о наличии дефекта посредством звуковой и световой сигнализации [8]. Метод позволяет выявить практически все описанные ранее дефекты ЛКП. К преимуществам метода можно отнести высокие скорость контроля и достоверность результатов.

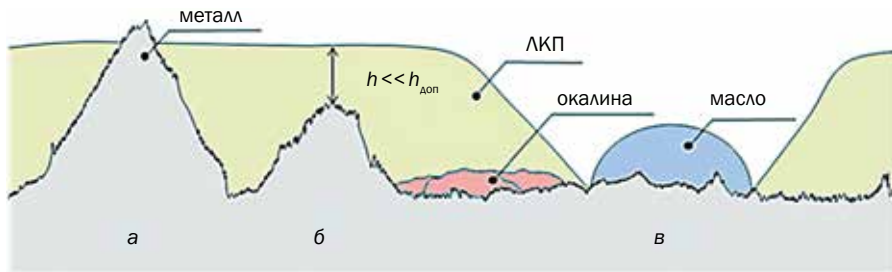


Рис. 1. Дефекты покрытия: а, в — непрокрасы; б — недопустимое утонение в области повышенной шероховатости

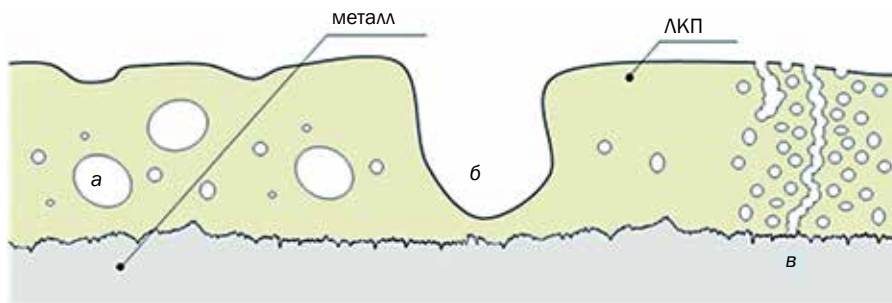


Рис. 2. Дефекты покрытия: а — полости; б — кратер; в — поры

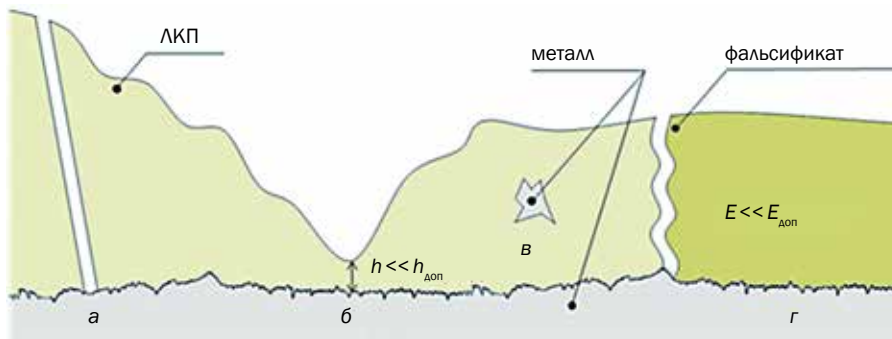


Рис. 3. Дефекты покрытия: а — трещина; б — недопустимое утонение непрокрашенной области; в — инородное включение; г — фальсификат

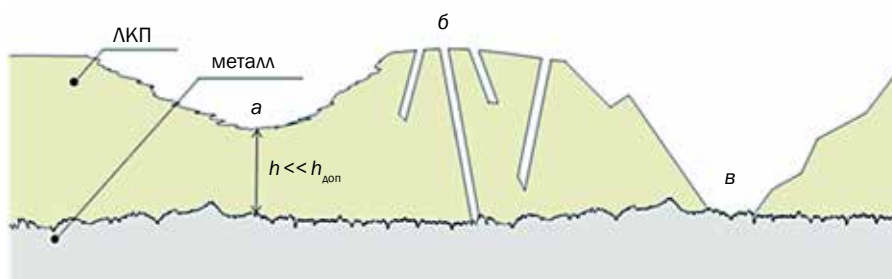


Рис. 4. Дефекты покрытия: а — недопустимое утонение; б — трещины; в — скол

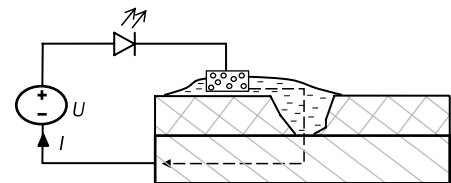


Рис. 5. Принцип действия электролитического метода НК

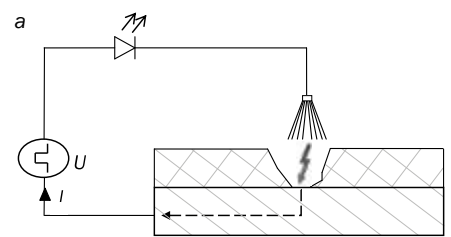


Рис. 6. Электроискровой метод НК: а — принцип действия; б — проведение контроля

Действующими стандартами [3–5] регламентировано применение ЭИМ для покрытий толщиной  $h > 500$  мкм и ЭЛМ — для  $h < 500$  мкм. Использование ЭЛМ обусловлено использованием низкого (до 100 В) контрольного напряжения, при котором полностью исключается возможность повреждения ЛКП путём пробоя. Однако опыт показывает, что на практике при НК покрытий изделий большой площади или протяжённости поверхности к ЭЛМ практически не прибегают в силу его малой производительности и технологических трудностей применения.

### Электроискровой контроль защитных ЛКП

Выполненный обзор показал, что указанные выше опасения в большинстве случаев не обоснованы, т. к. современные ЛКП ведущих производителей (табл. 1) обладают электрической прочностью  $E$ , существенно превышающей аналогичные характеристики воздуха (дефектных участков покрытия) [9]. На этом основании можно полагать, что для большинства ЛКП существует диапазон контрольных напряжений, в котором возможно проводить электроискровой контроль без нарушения защитных свойств покрытия.

Табл. 1. Электрическая прочность для различных ЛКП [9]

Покрытие	$E$ , кВ/мм
П-ЭП-177 (серая)	40
ЭП-49А	25
УП-2155	34
Фторопласт Ф-30П	>20
Фторопласт Ф-4МБ	20
Пентапласт А-2	35–40

Контрольное напряжение  $U$  для электроискрового метода должно выбираться в диапазоне  $U_{\min} < U < U_{\text{пр}}$ , где  $U_{\min}$  — минимальное контрольное напряжение,  $U_{\text{пр}}$  — пробивное напряжение защитного покрытия.

Согласно [4] зависимость  $U_{\min}(h)$  имеет вид  $U_{\min} = 0,104 h^{1/2}$  при  $h < 1$  мм, тогда для  $50 \text{ мкм} < h < 1000 \text{ мкм}$  минимальное контрольное напряжения составит  $0,7 < U_{\min} < 3,3 \text{ кВ}$ .

Пробивное напряжение ЛКП  $U_{\text{пр}}$  определяется электрической прочностью материала покрытия и его толщиной  $h$  [10]:  $U_{\text{пр}} = E \cdot h$ . В случае если  $E$  или  $h$  неизвестны, в [4] приведена процедура экспериментального определения пробивного напряжения с использованием электроискрового дефектоскопа:

1. определить толщину  $h$  ЛКП;

2. по определённому  $h$  установить  $U$  на уровне  $U_{\min}$ ;

3. плавно увеличивать контрольное напряжение до пробоя покрытия и появления звуковой и световой сигнализации на дефектоскопе, зафиксировать  $U_{\text{пр}}$ .

В [9] показано, что современные ЛКП ведущих производителей обладают электрической прочностью, существенно превышающей аналогичные характеристики воздуха (дефектных участков покрытия).

Выполненные авторами экспериментальные исследования показали, что для большинства ЛКП (в т. ч. порошковых)  $E$  составляет от 5 до 40 кВ/мм (табл. 1), т. е. для  $h \leq 1$  мм  $U_{\text{пр}} \geq (5–40)$  кВ, что существенно больше определённых в [4]  $U_{\min}$ .

Выбор значения  $U$  из допустимого диапазона  $U_{\min} < U < U_{\text{пр}}$  значительно уменьшает риск повреждения покрытия и при этом обеспечивает требуемую достоверность выявления дефектов покрытия при контроле.

Всё это подтверждает возможность и оптимальность применения электроискрового метода для НК сплошности ЛКП, особенно для изделий, имеющих большую площадь или для протяжённых объектов.

В настоящее время на территории Российской Федерации контроль ЛКП толщиной менее 1 мм не регламентирован действующими стандартами. В связи с чем, с учётом изложенных выше результатов проведённых исследований, в ООО «Константа» на основании стандарта ASTM D 5162–15 разработан и согласован межгосударственный стандарт ГОСТ 34395-2018 «Материалы лакокрасочные. Электроискровой метод контроля сплошности диэлектрических покрытий на токопроводящих основаниях», который устанавливает электроискровой метод определения сплошности ЛКП, нанесённых на токопроводящие основания толщиной не менее 25 мкм. Стандарт регламентирует процедуры выбора контрольного напряжения, подготовки и проведения контроля, а также отчёта о его результатах.

### Реализация электроискрового метода в дефектоскопах ведущих отечественных и зарубежных производителей

Большинство электроискровых дефектоскопов конструктивно состоят из блока управления и высоковольтного блока, к которому подключается электрод требуемой формы и исполнения.

Основными техническими характеристиками прибора являются вид прикладываемого к покрытию напряжения (постоянное или импульсное) и его величина.

В дефектоскопах с постоянным контрольным напряжением исключается понижение чувствительности при любой скорости контроля. Однако приложение к диэлектрическому покрытию высокого постоянного напряжения может вызывать старение этого покрытия, и ухудшение его защитных свойств [11]. Использование постоянного напряжения при контроле требует повышенных мер безопасности, также для его поддержания требуется больше энергии, что уменьшает время автономной работы прибора.

В большинстве импульсных дефектоскопов к покрытию прикладываются импульсы контрольного напряжения одной полярности длительностью около 10–20 мкс с частотой следования 20–60 Гц. Скорость контроля в данном случае существенно ограничивается частотой следования импульсов. С другой стороны, этот тип приборов в силу меньшего потребления электроэнергии имеет большую автономность, и так как время приложения контрольного напряжения к покрытию уменьшается на порядок, возможность старения покрытия практически исключается. Также для этого типа приборов возможна реализация ёмкостного заземления.

Следует отметить, что одной из основных особенностей применения импульсных электроискровых дефектоскопов для контроля сплошности ЛКП является то, что контроль может производиться даже при сравнительно небольшом напряжении, при котором искровой пробой дефектного участка покрытия не возникает, но в местах нарушения сплошности возрастает ток утечки, который также может быть зафиксирован. Однако при частоте следования импульсов в пределах 20–60 Гц затрудняется фиксация тока утечки. Увеличение частоты следования импульсов контрольного напряжения до 500–600 Гц позволяет повысить точность фиксации координат дефектов и уменьшить вероятность их пропуска.

Таким образом, современный электроискровой дефектоскоп, предназначенный для контроля сплошности ЛКП, должен обеспечивать сохранение защитных свойств покрытия после контроля, достаточное время автономной работы и высокую чувствительность к дефектам покрытия.

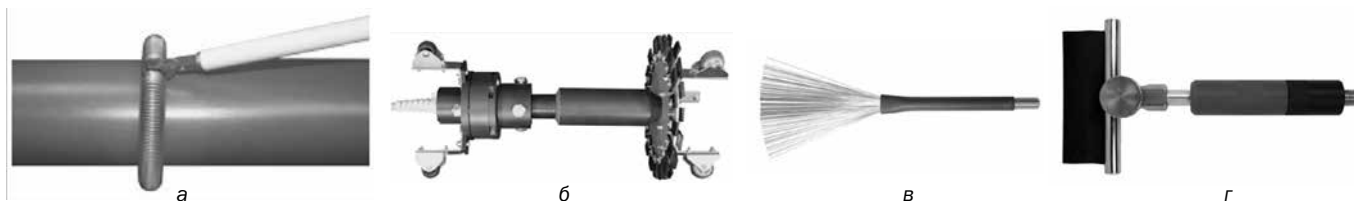


Рис. 7. Электроды для электроискрового дефектоскопа: а — пружинный; б — внутритрубный с толкателем; в — веерный; г — плоский резиновый

Табл. 2. Технические характеристики электроискровых дефектоскопов от различных производителей.

Прибор	Производитель	Страна	Вид $U$	$U$ , кВ	$f$ , Гц	$d$ , кВ	$\Delta$ , %	$t$ , ч	$T$ , °С	$d \times ш \times в$ , мм	$m$ , кг
Корона 1	Константа	РФ	Импульсное	0,7–4	600 (0,7–2кВ); 50 (2–4кВ)	0,1	5%	До 20	–40...+50	240×149×52	2
Elcometer 266	Elcometer	Великобритания	Постоянное	0,5–30	–	0,1	5%	До 40	0...+50	520×370×125	1,2
Elcometer-280	Elcometer	Великобритания	Импульсное	0,5–35	≈30	0,01–0,1	5%	До 30	0...+50	603×219×193	3
Inspect 8.0	Isotest	Германия	Импульсное	0,5–8	50	0,5	н.д.	До 9	н.д.	220×256×88	3,9
Compact-P	PCWI	Австралия	Импульсное	До 20	50	0,1	н.д.	н.д.	н.д.	260×160×70	2,2
PHD Pro' 0.5–6kV	Buckley	Великобритания	Постоянное	0,5–6	–	0,01–0,1	1%	До 16	0...+40	160×60×200	1,6
AP/W	Tinker & Razor	США	Импульсное	0,8–35	50	0,1	5%	н.д.	–10...+50	171×216×203	3,62

Стоит также упомянуть о нескольких наиболее универсальных типах электродов, полный набор которых обеспечивает возможность контроля практически всех возможных поверхностей и входит в состав дефектоскопов от ведущих производителей.

Для контроля сплошности наружной и внутренней изоляции труб применяются пружинный (рис. 7а) и внутритрубный (рис. 7б) электроды. Их конструкция предназначена для контроля поверхности трубы за один проход. Внутритрубный электрод, как правило, используется вместе с колёсными опорами и толкателем.

Веерный электрод предназначен для контроля сплошности покрытия сложнопрофильных изделий (рис. 7в). Конструкция и материалы электрода позволяет контролировать покрытия с малой механической прочностью. Также электрод обеспечивает высокую напряжённость электрического поля, прикладываемого к поверхности, тем самым увеличивая чувствительность прибора.

Плоские резиновые электроды используются для контроля поверхностей малой кривизны (рис. 7г). Мягкая токопроводящая резина обеспечивает повторяемость формы поверхности при высокой износостойкости.

Существуют и другие конструктивные решения специальных электродов, однако упомянутые электроды являются наиболее распространёнными.

В настоящее время выпускается достаточно большая номенклатура электроискровых дефектоскопов отечественного и зарубежного производства. Сравнение приборов по основным параметрам представлено в табл. 2.

Где:

н.д. — нет данных;

$U$  — контрольное напряжение;

$f$  — частота следования импульсов контрольного напряжения;

$d$  — дискретность установки контрольного напряжения;

$\Delta$  — точность поддержания контрольного напряжения;

$t$  — время непрерывной работы прибора;

$T$  — температурный диапазон работы прибора;

$d \times ш \times в$  — габаритные размеры блока контроля;

$m$  — масса блока контроля.

Из табл. 2 видно, что большинство приборов в принципе, применимы для контроля сплошности ЛКП, однако следует выделить прибор «Корона 1», у которого температурный диапазон работы от –40 до +50 °С и частота следования импульсов 600 Гц, что дополняет его применение во всех климатических регионах РФ и обеспечивает высокую достоверность результатов контроля [12].

### Заключение

Обоснование возможности применения электроискрового импульсного метода для контроля сплошности ЛКП, разработка межгосударственного стандарта, регламентирующего его применение, а также наличие на рынке соответствующего контрольного оборудования позволяют обеспечить качество защитных лакокрасочных и аналогичных им по назначению других диэлектрических покрытий при их нанесении и добиться существенно экономического эффекта при эксплуатации изделий.

### Литература

- Лакокрасочные покрытия в машиностроении/Справочник. —М.: Машиностроение, 1974. — 576 с.
- Fletcher J. High Voltage Porosity Testing I Continuous DC vs. Pulsed DC [Электронный ресурс] / URL: <http://www.elcometerusa.com/High-Voltage-Porosity-Testing-Continuous-DC-vs-Pulsed-DC.html> (Дата обращения: 06.02.2018)
- ASTM D 5162: 2015/Standard Practice for Discontinuity (Holiday) Testing of Nonconductive Protective Coating on Metallic Substrates.
- ASTM G 62: 2014/Standard Test Methods for Holiday Detection in Pipeline Coatings.
- NACE SP0188: 2006 Discontinuity (Holiday) Testing of New Protective Coatings on Conductive Substrates.
- ГОСТ P51164–98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. — М.: Изд-во стандартов, 1998. — 46 с.
- ГОСТ 21515–76. Материалы диэлектрические. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 2005. — 14 с.
- Ерехинский Б.А., Пахомов А.В. Современные технологии диагностики объектов добычи газа и газового конденсата. Применяемая техника и оборудование. — Воронеж: АО «Воронежская областная типография», 2017. — 374 с.
- Семенова Л.В., Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Нефедов Н.И. Электроизоляционные свойства полимерных покрытий. — Труды ВИАМ. 2014. № 8.
- Пилатов Е. Электроискровой контроль сплошности. — ТехНАДЗОР. 2013. №4 (77). — С.102–103.
- Воробьев Г.А., Похолков Ю.П., Королев Ю.Д., Меркулов В.И. Физика диэлектриков (область сильных полей) / Учебное пособие. — Томск: Изд-во ТПУ, 2003. — 224 с.
- Мустафин Ф.М., Быков Л.И., Гумеров А.Г. и др. Промысловые трубопроводы и оборудование /Учебное пособие. — М.: ОАО «Издательство «Недра», 2004. — 662 с.

Статья получена 3 апреля 2018 г., в окончательной редакции — 15 июня