

ПОТОЧНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ. ЧАСТЬ 2

ИГОРЬ МУРОХ, д.ф.н.

ЕВГЕНИЙ ДУГИН, dugin@ranet.ru

Системы маркировки кабелей и проводов методом струйной печати широко используются в авиакосмической промышленности. В первой части статьи (начало см. в ЭК9, 2014 г.) была в т.ч. описана система обработки плазмой нормального давления PT-1000, принцип работы которой основан на явлении диэлектрического барьерного тлеющего разряда. В заключительной части статьи показано, что плазменная обработка является наиболее эффективным и универсальным способом улучшить устойчивость и износостойкость маркировки.

Напряжение пробоя в воздухе при нормальном атмосферном давлении для высоковольтных электродов разного диаметра показано на рисунке 2. Очевидно, что для наиболее эффективной обработки для провода разного диаметра могут потребоваться разные электроды. Характерные осциллограммы разряда показаны на рисунке 3.

Поведение разряда очень разное у положительных и отрицательных волн напряжения, передаваемого на внешний цилиндр. В первом случае амплитуда тока разряда больше, а общая длительность разряда – короче. В области сильного отрицательного поля вблизи поверхности провода положительные ионы достигают энергии высокого уровня ещё до столкновения с поверхностью провода. Вторичные электроны, высвобожденные из поверхности в результате ионного облучения, вызывают лавины электронов, движущиеся в противоположном направлении, в результате чего образуется множе-

ство положительных ионов, которые, в свою очередь, вызывают новые лавины электронов и т.д. Разряд существует до тех пор, пока локализованный положительный заряд на поверхности провода не ослабит электрическое поле ниже пробивного значения. Когда провод заряжен положительно, поле в катодной области слишком слабое, чтобы поддерживать ионизацию газа с помощью электронов; разряд в таком случае поддерживается иными механизмами. Это соответствует тому факту, что в большинстве случаев провод, выходящий из камеры плазменной установки, обладает избыточным положительным зарядом, о чём свидетельствуют показания электростатического вольтметра. В таблице 1–3 приведены результаты испытаний на стойкость маркировки проводов разных видов в различных лабораториях. Во всех случаях маркировка была нанесена поточным способом с помощью системы плазменной обработки компании Tri-Star

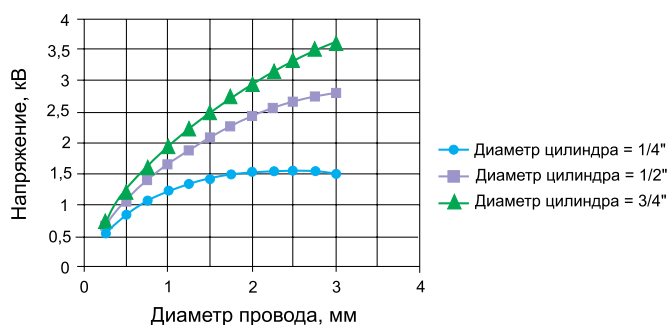


Рис. 2. Зависимость напряжения пробоя в воздухе от диаметра провода при использовании различных цилиндрических электродов

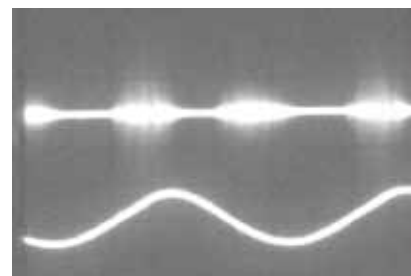


Рис. 3. Разрядный ток в воздухе нормального атмосферного давления при синусоидальном высоковольтном сигнале ($V_{ma} = 3$ кВ, $f = 17$ кГц)

Technologies. Данные ясно показывают значительное увеличение стойкости при наличии плазменной обработки. В случае с изолированным проводом Tefzel относительное увеличение стойкости составило 1000% (см. табл. 3).

Воздействие УФ, как и выравнивание провода, проходящего через УФ-печь, могут повлиять на качество маркировки, т.к. большинство чернил, используемых в авиакосмической промышленности, являются УФ-отверждаемыми. Несмотря на то, что испытание на стойкость маркировки является конечным приёмочным испытанием, оно показывает только качественное преимущество плазменной обработки. Количественный анализ воздействия плазменной обработки на разные типы изоляции проводов требует более объективных методов испытания, которые не зависят от особенностей отдельных систем маркировки. Одним из таких способов является измерение угла смачиваемости [41–42]. Результаты измерений для поверхности провода 22759/11-20, проведенных с помощью VCA-2500XE (система видеонали-

за угла смачиваемости, ASC Products, Биллерика, Массачусетс), приведены в таблице 4–5. Для анализа угла смачиваемости и расчёта поверхностной энергии в системе используется высокоточная оптика и ПЗС-камера, а также средства технического и программного обеспечения для обработки изображений. Для того чтобы получить статистически достоверное значение угла смачиваемости, на каждый образец провода для каждой жидкости фиксируется от 24 до 33 значений угла смачиваемости. Измерения угла смачиваемости и расчёты поверхностной энергии в одинаковой степени указывают на улучшение гидрофильных свойств образцов, прошедших плазменную обработку. Наилучшие результаты были достигнуты при плазменной обработке в аргоне с небольшим (< 1%) добавлением аммиака.

Другой метод был разработан компанией Tri-Star Technologies специально для измерения гидрофильности поверхности проводов. Когда небольшая капля жидкости падает с конца стеклянного капилляра под воздействием силы тяжести, масса капли прямо пропорциональна поверхностному натяжению жидкости и радиусу капилляра [43]. Если известны радиус капилляра и масса капли (непосредственно перед её отрывом от поверхности), можно определить поверхностное натяжение жидкости. Когда капля отделяется от поверхности горизонтально расположенного провода, масса капли (при заданном поверхностном натяжении жидкости) зависит от диаметра провода, поверхностной энергии изоляционного материала, а также от шероховатости, пористости и локальных особенностей поверхности. Все эти факторы могут влиять на стойкость маркировки. Измерение критического объёма капли воды (т.е. максимальной массы капли, при которой она способна оставаться на поверхности горизонтально расположенного провода) позволяет получить и сравнить некоторые количественные данные, описывающие общую способность поверхности впитывать чернила до и после плазменной обработки. На рисунке 4 иллюстрируется зависимость критического объёма капли воды от диаметра провода и поверхностной энергии. В целом, более высокая поверхностная энергия материала и больший диаметр провода дают более высокое значение критического объёма капли воды. Очевидно, что провод с «нулевым диаметром» способен удержать каплю с «нулевым объёмом». При увеличении диаметра провода критический объём капли воды достигает некоторого максимального значения, которое в большой степени определяется поверхностным натяжением жидкости, чем поверхностными свойствами твёрдого тела.

Таблица 1. Стойкость маркировки, которая была нанесена на провода, обработанные пламенем и плазмой (Woven Electronics, Simpsonville, SC)

Тип изоляции	ЭТФЭ			ЭТФЭ			ИР ЭТФЭ			ИР ЭТФЭ			ФЭП					
Образец провода	M27 5000-24TE2U00			M27 500-20TQ2T14			M27 500-24502T23			M29-20186/1			WS 19199/2-20-1			MIL-C 17G		
Поставщик				Thermax			Thermatics			Judd			Delta			Thermax		
Испытание обработки	U	F1	P1	U	F1	P1	U	F1	P1	U	F1	P1	U	F1	P1	U	F1	P1
Стирание (палец)	F	P	P	F	F	P*	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F	F	F
Стирание (ластик)	F	P	P	F	F	P*	F	P	P	F	P	P	F	P*	F	F	F	P*
Спирт	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P*	F	F	F	P*
1-1-1 трихлор	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P	F	F	F	P*
ТМЦ (фреон)	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P	F	F	F	P*
Вода +	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P	F	F	F	P*
ацетон	F	F	P*	F	P*	F	F	P	P	F	F	P*	F	P*	F	F	F	P*
Erosolve 30%	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P*	F	F	F	P*
Липкая лента	F	P	P	F	F	P*	F	P	P	F	P	P	F	P	F	F	F	P*
Термический шок	F	P	P	F	F	P*	F	P	P	F	P	P	F	P*	F	F	F	P*
масло ISO	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F	F	F	P*
DIN-ручка (40 дин/см)	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P	F	F	F	F
Холодовый шок	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P*	F	F	F	P*

Примечания.

Все провода были промаркированы чернилами, отверждаемыми под действием ультрафиолетового излучения

U – без обработки, F1 – обработка пламенем, P1 – обработка плазмой

F – испытание не пройдено, P – испытание пройдено

Стирание (палец), 20 отдельных усилий со средним давлением

Стирание (ластик) согласно Mil-M-9153, 4,62

Спирт, трихлор, ТМЦ, вода, ацетон и Erosolve согласно Mil-Std 202

Липкая лента. Прижать к маркировке на 30 с, отклеить и прочесть маркировку

Термический шок: согласно WS 19185

Масло ISO, вымачивать в течение 48 ч, протереть один раз

DIN-ручка, проверить распределение по поверхности провода

Холодовый шок, 5 мин при -40F, согнуть и протереть.

Таблица 2. Результаты испытания на истирание с жидкостью скайдрол (пр-во McDonnell Douglas, Лонг-Бич, Калифорния) по методу DMS 2325. Испытание проводилось на опознавательной маркировке изолированного провода Kaptol, нанесённой с помощью M-100 Dot-Matrix Wire Marker

Условия	Без обработки	Обработка плазмой	Тепловая обработка	Комбинированная тепловая и плазменная обработка
Образец № 1	12	> 30	14	> 30
Образец № 2	12	> 30	30	> 30
Образец № 3	10	> 30	26	> 30
Образец № 4	14	> 30	18	> 30
Образец № 5	30	> 30	26	> 30
Образец № 6	16	> 30	24	> 30
Образец № 7	22	> 30	14	> 30
Образец № 8	26	> 30	22	> 30
Образец № 9	30	> 30	50	> 30
Образец № 10	30	> 30	22	> 30

Примечание: После 30 отдельных усилий на истирание испытания прекращались.

Золотое покрытие медно-никелевых контактов обладает большой поверхностной энергией (выше 100 дин/см), и таким образом, они могут удерживать капли большего размера по сравнению с фторполимерами с низкой поверхностной энергией. Однако разница не столь значительна, как можно

было бы ожидать, основываясь на разнице поверхностных энергий. Такое покрытие обладает более гладкой и куда менее пористой поверхностью, чем провода, покрытые прессованным фторполимером, за счёт чего может быть скопечено высокая поверхностная энергия материала. На рисун-

ке 5 показаны результаты состаривания провода, прошедшего плазменную обработку, в зависимости от времени воздействия плазмы. Провод 16878/6-26, покрытый прессованным ПТФЭ, обладает изначальным критическим объемом капли воды, равным 13 мл, и диаметром 0,65 мм. Синусоидальный высоковольтный сигнал частотой 17 кГц был передан на цилиндрический электрод с внутренним диаметром ¼ и длиной 4 дюйма. Общее потребление электроэнергии из источника электропитания составило 35 Вт. Время воздействия в 1 и 0,1 с соответствует скорости намотки кабеля 20 и 200 фут/мин. Как следует из диаграммы, при данных установках плазменная обработка достигает оптимального значения (уровня насыщения) приблизительно на 0,3 с. При хранении обработанной таким образом поверхности на открытом воздухе при нормальных условиях эффект, достигнутый в результате такой обработки, уменьшается с максимального значения критического объема капли воды, равного 25 мл, до 22 мл за две недели. Уменьшение на 15% за первые две недели приблизительно соответствует убыванию некомпенсированного электрического заряда на поверхности ПТФЭ.

Зависимость критического объема капли воды от времени воздействия плазмы для проводов из ЭТФЭ показана на рис. 6. Кривые имеют аналогичную форму, как и на предыдущем рисунке, и достигают оптимального значения приблизительно на 0,5 с. Критический объем капли воды увеличивается с 26 до 57 мл для шитого ЭТФЭ, обработанного в воздухе, и с 29 до 53 мл для стандартного ЭТФЭ, обработанного в аргоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система обработки плазмой РТ-1000 значительно улучшает стойкость маркировок, нанесенных на поверхность проводов и кабелей с изоляцией из таких материалов как Tefzel, Kapton, Тейлон и прочих материалов, представ-

Таблица 3. Результаты испытания на истирание абразивной лентой, проведенного в Raychem (Менло-Парк, Калифорния), на опознавательной маркировке изолированного провода Tefzel, образец 55, нанесенной с помощью M-100J Ink-Jet Wire Marker

Скорость намотки кабеля	30 фут/мин	60 фут/мин	120 фут/мин
Воздействие УФ	1 с	0,5 с	0,25 с
Среднее кол-во циклов			
Без плазмы	7	11	12
Среднее количество циклов С плазмой	58	> 125	48

Метод испытания: поршневой кулачковый механизм с моторным приводом, оснащенный счётчиком с возвратом на ноль и зажимом для фиксации образцов, длина хода 3/8» при скорости 60 циклов в минуту. Контактная поверхность представляет собой гладкую стальную иглу цилиндрической формы диаметром 0,025». Прилагаемая нагрузка – 500 г. Один цикл соответствует двум движениям.

Примечание. После 125 циклов испытания прекращались.

Таблица 4. Измерения угла (градусы) смачивания для ФЭП изоляции провода, обработанной плазмой (22759/11-20)

Обработка плазмой	Вода поверхностное напряжение 72 дин/см	Йодистый метилен поверхностное напряжение 50 дин/см	Ксилен поверхностное напряжение 30 дин/см
Без обработки	101 ±5	75 ±4	46 ±4
Воздушная плазма	94 ±8	70 ±3	32 ±3
Аргонная плазма	90 ±4	66 ±5	23 ±5
Аргон и аммиак	82 ±4	67 ±6	20 ±7

Таблица 5. Расчёт поверхностной энергии на основании измерения угла смачивания для ФЭП изоляции провода, обработанной плазмой (22759/11-20)

Условия плазменной обработки	Среднее гармоническое			Среднее геометрическое		
	Рассеивающий компонент, дин/см	Полярный компонент, дин/см	Всего, дин/см	Рассеивающий компонент, дин/см	Полярный компонент, дин/см	Всего, дин/см
Без обработки	17,3	5,4	22,7	14,3	2,6	16,9
Воздушная плазма	20,5	1,1	27,3	17,7	3,9	21,6
Аргонная плазма	19,9	9,1	29,0	16,4	6,0	22,4
Аргон и аммиак	23,0	11,5	34,5	19,3	8,40	27,7

ляющих трудности при нанесении маркировки. Маркировка проводов, обработанных с помощью данной системы, соответствует большинству военных и гражданских стандартов. РТ-1000 является уникальной модульной системой, которая подходит для всех известных процессов маркировки проводов/кабелей, включая растровую, струйную, глубокую и офсетную печать. После обработки с помощью системы РТ-1000 провод или кабель не требует какой-

либо дополнительной обработки спиртом или пламенем, прогрева и т.д. Обработанная поверхность сохраняет свои улучшенные гидрофильные свойства ещё некоторое время после обработки (до нескольких недель). Срок годности такой обработки зависит от условий хранения и типа изоляционного материала.

В случае с фторполимерами данный эффект может сохраняться вплоть до одного года, но постепенно он ослабе-

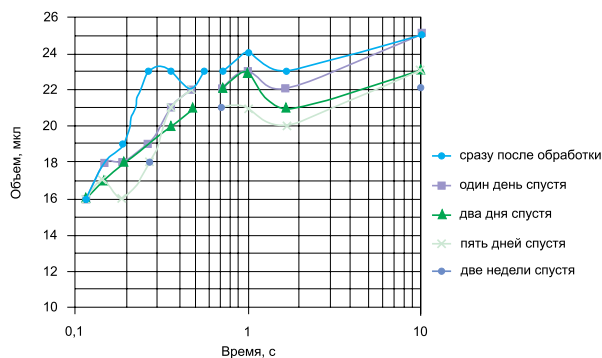


Рис. 5. Зависимость критического объема капли воды от времени воздействия плазмы для провода 16878/6-26

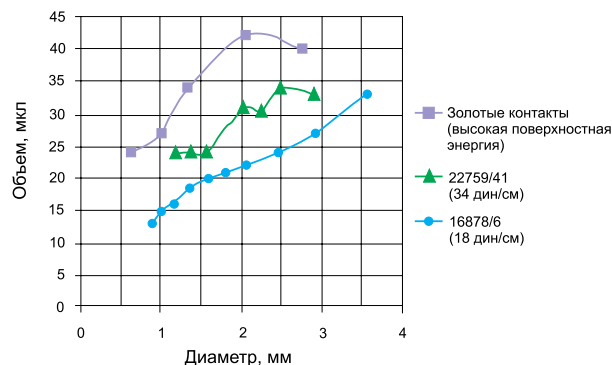


Рис. 4. Зависимость критического объема капли воды от диаметра провода для материалов с различной поверхностной энергией

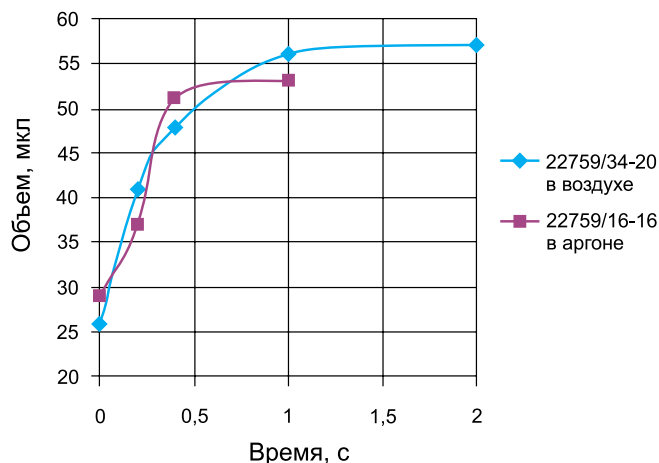


Рис. 6. Зависимость критического объема капли воды от времени воздействия плазмы для проводов из ЭТФЭ

вает, а гидрофильность поверхности возвращается к своему изначальному значению. Для кабелей и проводов различного диаметра могут также потребоваться различные электроды. Поскольку система РТ-1000 работает с использованием воздуха нормального атмосферного давления, ей не требуются какие-либо особые настройки в отношении типа газовой смеси или уровня давления. При необходимости в камеру обработки вводятся специальные газовые смеси.

Система РТ-1000 может обрабатывать провода и кабели самых различных диаметров и типов, не повреждая их изоляции. Она также поддерживает линейную скорость намотки до 1000 фут/мин.

ЛИТЕРАТУРА

41. S. Wu. *Polymer Interface and Adhesion*. (Marcel Dekker, New York, 1982).
42. *Modern approaches to wettability: theory and applications* (edited by M.E. Schrader and G.I. Loeb. Plenum Press. New York. 1992).

43. J. de Boer. *Atomic theory of heat. Thermodynamics*. (Pergamon Press, London, 1959).

Компания ЗАО «Радиант-Элком» является официальным дистрибьютором компании Calisle, в состав которой входит американский завод-производитель маркировочного оборудования Tri-Star Technologies. Наши специалисты с радостью ответят на интересующие вопросы, связанные с маркировкой кабеля и особенностями работы маркировочных установок. Плазменную установку РТ-1000, описанную в этой статье, можно приобрести не только отдельно, чтобы использовать её в линии с уже установленным на предприятии принтером струйной маркировки, но и в составе оборудования М-100J, специально предназначенного для маркировки авиационных проводов. Мы готовы предложить клиентам комплексные поставки данных установок, которые включают весь спектр сопутствующих услуг, начиная с технических консультаций по вопросам эксплуатации и заканчивая проведением пусконаладочных работ на предприятиях заказчика и обучением персонала.