



# Влагопроницаемость покрытий печатных узлов: фантазии на тему

**В производстве радиоэлектронной аппаратуры, и в области ее влагозащиты в частности, существует множество проблем, явных и скрытых. Последние невооруженным взглядом не так-то просто обнаружить. В данной статье приведены размышления о проблеме-невидимке, решение которой, по мнению автора, может привести к революционным изменениям в области влагозащиты печатного монтажа.**

**Владимир Уразаев,  
к. т. н.**

urazaev@yandex.ru

Влагозащитное покрытие является диффузионным барьером на пути влаги к поверхности печатной платы. Это известный факт. Технология полимеризационного наполнения, разработанная автором, позволяет повысить эффективность этого барьера, уменьшая его диффузионную проницаемость (влагопроницаемость) [1]. Разработчики полимерных покрытий также стремятся к тому, чтобы этот барьер был как можно более эффективным. Зададим себе на первый взгляд парадоксальный вопрос, а нужно ли это?

## Доводы «за»

Влагопроницаемость полимеров — это способность полимерных материалов пропускать водяные пары при наличии перепада давления последних. Влагопроницаемость можно рассматривать как частный случай газопроницаемости, поскольку исходное состояние воды — газообразное. В общем случае влагопроницаемость зависит от химического состава и структуры полимера, концентрации в нем воды (влагосодержания) и температуры.

Коэффициент влагопроницаемости ( $W$ ) определяется массой паров воды, прошедшей в единицу времени через единицу площади при единичных толщине и перепаде давления водяных паров. Коэффициент влагопроницаемости связан с коэффициентом растворимости ( $S$ ) и коэффициентом диффузии ( $D$ ) следующим уравнением:

$$W = DS.$$

Диффузия паров воды в гидрофильных и в гидрофобных полимерах происходит по-разному. Гидрофильные полимеры содержат полярные группы, способные образовывать с водой водородные связи. Коэффициент диффузии в таких полимерах зависит

от содержания в них воды и может быть приближенно рассчитан по уравнению:

$$\lg D = \lg D_0 + 0,08c,$$

где  $D_0$  — коэффициент диффузии при содержании воды в полимере, стремящемся к нулю;  $c$  — содержание воды на 100 г полимера.

Коэффициент влагопроницаемости уменьшается с уменьшением гидрофильности и увеличением степени кристалличности полимера и частоты поперечных связей между макромолекулами в трехмерных полимерах.

В гидрофобных полимерах диффузия паров воды происходит по тому же механизму, что и диффузия инертных газов. Коэффициент влагопроницаемости увеличивается с повышением гибкости макромолекул и уменьшением межмолекулярного взаимодействия.

Ниже приведены значения коэффициентов влагопроницаемости для некоторых полимеров при 20–25 °C ( $W \times 10^{-8}$  г/см·ч·мм рт. ст.) [2]:

полиметилсилоксан	20;
поли-ε-капроамид	4–8;
полиметилметакрилат	3–4;
полиэтилентерефталат	2–5;
полистирол	2–4;
поливинилхлорид	1,3;
полиэтилен	0,2–0,4;
политетрафторэтилен	0,01–0,04;
политрифторхлорэтилен	0,006–0,015.

Итак, независимо от того, какова природа полимера (гидрофобный или гидрофильный), и, следовательно, независимо от механизма, по которому происходит диффузия, чем меньше величина «отверстий», через которые нужно пройти молекулам воды, тем лучше. Каким образом реализу-

ются эти маленькие «отверстия» — увеличением степени сшивки полимера или введением в существующую полимерную сетку дополнительной полимерной сетки (полимеризационное наполнение) — не принципиально. Важен конечный результат — снижение влагопроницаемости покрытия и повышение эффективности влагозащиты печатных узлов.

Все логично. Основная функция влагозащитного покрытия — диффузионный барьер для влаги. И чем лучше этот барьер (чем менее он проницаем), тем в более комфортных условиях работает печатный узел. Но это всего лишь формальная логика. Существует еще и противоречивая логика [3]. С точки зрения последней не все и не всегда однозначно.

#### Доводы «против»

Низкая влагопроницаемость полимерного покрытия приветствуется в тех случаях, когда печатные узлы эксплуатируются в атмосфере с постоянной относительной влажностью (большей или меньшей) или когда колебания относительной влажности во времени невелики. Увы, в реальных условиях подобная ситуация — большая редкость. Влажность окружающей среды изменяется постоянно. Период этих колебаний зависит от географического расположения, от изменения погодных условий, смены дня и ночи, условий эксплуатации РЭА и других факторов. Амплитуда колебаний также зависит от множества причин.

Низкая влагопроницаемость полимерного покрытия приносит пользу и в тех случаях, когда печатные узлы подвергаются относительно кратковременному воздействию атмосферы с повышенной влажностью. Тогда высокоэффективный диффузионный барьер в состоянии надежно защитить печатный узел от «намокания». Влага проникает неглубоко, а при последующем уменьшении влажности окружающего воздуха довольно быстро покидает печатный узел, возвращая его в исходное состояние. Такие ситуации встречаются очень часто.

Осуществим инверсию. Пусть время пребывания печатного узла в атмосфере с повышенной влажностью станет намного больше времени его пребывания в атмосфере с низкой влажностью. Это характерно для стран с влажным субтропическим климатом. В Индии и Юго-Восточной Азии практически в течение всего года температура воздуха превышает 20 °С, причем относительная влажность выше 80% наблюдается не менее 12 часов в сутки [4].

Абсолютно непроницаемых полимеров в природе не существует. Поэтому при длительном пребывании печатного узла в атмосфере с высокой влажностью влага проникает даже через очень эффективный диффузионный барьер. С другой стороны, эта высокая эффективность диффузионного барьера противодействует удалению влаги из печатного узла в те кратковременные промежутки времени, когда относительная влажность окружающего воздуха уменьша-

ется. Следствие — аккумуляция влаги в объеме печатного узла и его постоянная работа в самых неблагоприятных условиях. И это достигается... благодаря очень высокой «диффузионной непроницаемости» полимерного покрытия! Получается так, что в тяжелых условиях эксплуатации самые высокоэффективные защитные покрытия (с минимальной влагопроницаемостью) проявляют себя не с лучшей стороны.

Аналогичная проблема возникает и, казалось бы, в самых легких условиях эксплуатации (в космосе). В безвоздушном пространстве влаги нет, но она есть на Земле. Поэтому влагозащитное покрытие на печатных узлах, предназначенных для эксплуатации на космических объектах, все-таки необходимо. И чем меньше его диффузионная проницаемость, тем лучше.

Лучше на Земле, а в космосе? Для космоса лучше, если бы его не было вообще. Поэтому на практике реализуется половинчатое решение. Для влагозащиты печатных узлов, предназначенных для эксплуатации в вакууме, используют так называемые дышащие покрытия (с высокой диффузионной проницаемостью и/или уменьшенной толщиной). Благодаря этому печатные узлы довольно быстро освобождаются от влаги. Чуть хуже здесь, чуть лучше там... Решение на уровне компромисса.

Таким образом, в самых тяжелых условиях эксплуатации и не только, очевидное решение задачи повышения влагостойкости РЭА приводит к неочевидным результатам. Как быть?

#### Решения

Трудно ожидать изобилия решений той проблемы, которая запрятана очень глубоко. В пользу такого утверждения говорит формальная логика. А вот противоречивая логика подсказывает, что для решения этой проблемы влагозащитное покрытие должно быть одновременно проницаемым и непроницаемым. Точнее, влагозащитное покрытие должно быть непроницаемым для влаги извне и проницаемым для влаги изнутри печатного узла. Покрытия, в которых будет реализован такой принцип, должны «чувствовать себя» уверенно и в Индии, и в космосе, и вообще где угодно.

Каким образом можно получить такие «высокоинтеллектуальные» покрытия? Или хотя бы какие подходы можно применить? Попробуем ответить на эти вопросы.

Отвлечемся на некоторое время от печатных плат. Поговорим о проблеме, которая ближе к телу как в прямом, так и в переносном смысле. Речь пойдет о противоречивых требованиях к нашей одежде и, особенно, к обуви. С одной стороны, обувь не должна пропускать влагу извне, чтобы ноги не промокли со всеми вытекающими из этого неприятными последствиями. С другой стороны, та же обувь должна пропускать влагу, чтобы ноги «дышали». Абсолютное совпадение с теми противоречивыми требованиями, которые мы сформулировали по отношению к влагозащитным покрытиям печатных плат.

Судя по тому, что люди обычно отдают предпочтение обуви из натуральной кожи, лучше всего эти противоречивые требования разрешаются природой.

Натуральная кожа представляет собой материал, изготовленный из среднего слоя (дермы) шкуры животного [5]. Дерма образована переплетающимися пучками волокон соединительной ткани, состоящей в основном из коллагена. Межволоконные вещества (в основном животные белки) удаляются в процессах кожевенного производства.

Коллаген — фибриллярный белок, составляющий основу соединительной ткани и обеспечивающий ее прочность; наиболее распространенный белок животного мира. Молекула коллагена имеет молекулярную массу около 300 000, длину 300 нм, толщину 1,5 нм. Структурно представляет собой стержень, состоящий из трех цепей, закрученных в тройную спираль. Структура коллагена упорядочена четырехжды. Первичная структура характеризуется последовательностью аминокислот и правильным чередованием неполярных (гидрофобных) и полярных (гидрофильных) участков. Стабилизация молекул коллагена осуществляется благодаря электростатическим и гидрофобным взаимодействиям, а также водородным и ковалентным поперечным связям между цепями. Коллаген гигроскопичен, набухает в воде. Однако после дубления структура дермы фиксируется с образованием химических связей.

Высокие влаго- и паропроницаемость передаются натуральной коже «по наследству». Для обувщиков это приоритетные свойства. Влагостойкость для натуральной кожи — приобретенное свойство. Она реализуется человеком в процессах дубления, жирования, наполнения кожи и нанесения поверхностного покрытия. И в некоторых случаях получаются очень даже неплохие результаты.

Практический опыт показывает, что противоречивые требования по отношению к влагопроницаемости изделий из полимерных материалов могут быть успешно разрешены. Хотелось бы один к одному перенести эти решения в другую промышленность, но увы, по целому ряду причин это невозможно: другая задача, другие требования. Печатные платы с кожным покрытием вызывают только улыбку. Можно лишь творчески переработать эти решения. Так которые из них можно (нужно) адаптировать для решения нашей проблемы?

Представляет интерес использование многослойных (многокомпонентных) полимерных покрытий, слои которых отличаются по химической природе и/или по физической структуре. Некоторые подобные решения уже используются в легкой промышленности при изготовлении так называемых искусственных кож. Искусственные кожи на нетканой волокнистой основе, в которых в качестве связующего материала и материала лицевого слоя используются полиэфируретаны, прекрасно сочетают водостойкость и гигиенические свойства [6]. А ведь те же полиэфируретаны применяются и для получения влагозащитных покрытий! Эпоксидно-уретановый лак УР-231 — их



дальний родственник. Родство зарубежных чисто полиуретановых покрытий еще ближе.

На первый план выдвигается еще и сочетание в полимерном материале гидрофильных и гидрофобных свойств. В «аналоге» гидрофильно-гидрофобные взаимодействия реализуются как в первичной структуре коллагена, так и в надмолекулярном уровне (жирование и др.). Во влагозащитных покрытиях для этого можно использовать:

- привитую полимеризацию гидрофобных фрагментов к гидрофильным полимерам, или наоборот;
- смеси полярных и неполярных полимеров;
- особый вид смесей — взаимопроникающие полимерные сетки (ВПС) [7].

Подробнее о ВПС. Думаю, что лучшим вариантом будет ВПС типа «змея в клетке» (где линейный полимер — гидрофильный, а сетчатый — гидрофобный), который к тому же находится еще и в высокоэластическом состоянии.

В высокоэластическом состоянии в условиях практического применения печатных узлов находятся кремнийорганические (силиконовые) полимеры. Силиконовые покрытия в качестве самостоятельных широко используются в технологиях влагозащиты печатного монтажа. И это несмотря на их сверхвысокую влагопроницаемость [2]. Очевидно, влагозащитные свойства таких покрытий обеспечиваются преимущественно их гидрофобностью. А вот сверхвысокая влагопроницаемость, думаю, способствует удалению влаги из печатного узла. Напрашивается вывод, что если не принимать во внимание некоторые другие моменты, силиконовые покрытия — лучший вариант влагозащиты для особых условий эксплуатации печатных узлов. Оказывается, решения скрытой проблемы реализуются явно и в технологиях влагозащиты печатного монтажа.

Сверхвысокая влагопроницаемость кремнийорганических полимеров обусловлена низким межмолекулярным взаимодействием и очень высокой гибкостью участков макромолекул, реализующих пространственную сетку [8]. Высокая гибкость свидетельствует о том, что размеры «отверстий», через которые диффундируют молекулы воды, могут изменяться во времени. А почему бы не сде-

лать так, чтобы они изменялись по размеру не случайным образом, а по определенному алгоритму?

Когда влага проникает внутрь, они должны быть маленькими; когда влага отдается окружающей среде, они должны быть большими. В идеальном случае эти «отверстия» сами должны уменьшаться и увеличиваться. Для реализации такого решения можно использовать внутренние ресурсы системы, например влажность окружающего воздуха. При высокой влажности стенки «отверстий» должны сдвигаться, а при низкой влажности раздвигаться. Физически это может быть реализовано в результате электростатических взаимодействий (притяжение/отталкивание фрагментов полимерных цепей), образования или разрушения водородных связей и др. Именно такие взаимодействия ответственны за упорядочение структуры и иные процессы, происходящие в макромолекулах коллагена.

Остается подобрать такой полимер, который в зависимости от влажности ведет себя соответствующим образом. Интуиция подсказывает, что такую схему можно реализовать с использованием гидрофильных полимеров, а еще лучше с использованием полимеров с полупроводниковыми свойствами. А как же диэлектрические свойства? Вариант — использование такого покрытия по уже существующему влагозащитному покрытию с высокими диэлектрическими характеристиками. Кстати, подобное решение позволит параллельно решить еще одну проблему — накопление статического электричества на поверхности печатного узла.

Можно использовать внутренние ресурсы самих печатных узлов — электрическую энергию. «Включать» и «выключать» изменение размеров «отверстий» можно электрическими сигналами. Ближайшая аналогия — жидкокристаллические индикаторы. Но это решение чуть хуже.

Приведенные выше «фантазии» и есть варианты разрешения перечисленных ниже физических противоречий (ФП) задачи (проблемы).

ФП 1. «Отверстия» в покрытии должны быть маленькими, чтобы вода не могла проникать к поверхности печатного узла, и одновременно они должны быть большими, чтобы вода легко удалялась из печатного узла.

ФП 2. «Отверстия» в покрытии должны быть маленькими при высокой влажности окружающей среды и большими при низкой.

Другие варианты физического противоречия этой задачи можно сформулировать следующим образом.

ФП 3. Частицы воды должны быть большими, чтобы было затруднено их проникновение через лаковую пленку к поверхности печатной платы, и маленькими, чтобы легко проникать через эту пленку обратно.

Или даже так.

ФП 4. Влагозащитное покрытие должно быть, чтобы..., и влагозащитного покрытия не должно быть, чтобы...

И так далее и тому подобное. Вариантов противоречий множество, так же как и вариантов их разрешений. Думаю, что, отталкиваясь от них, можно найти интересные, патентоспособные и даже работоспособные решения.

## Литература

1. <http://www.urazaev.narod.ru>
2. Химическая энциклопедия в 5 т. Т. 1 // Кнунянц И. Л. и др. М.: Сов. энцикл., 1988.
3. Уразаев В. ТРИЗ в электронике // Компоненты и технологии. 2005. № 2–5.
4. Астафьев А. В. Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. М.: Энергия, 1965.
5. Страхов И. П. Химия и технология кожи и меха. М.: Легкая индустрия, 1986.
6. Андрианова Г. П. Химия и технология полимерных пленочных материалов и искусственной кожи. М.: Химия, 1981.
7. Уразаев В. Все взаимопроникает, все...// Технологии в электронной промышленности. 2005. № 3.
8. Рейтлингер С. А. Проницаемость полимерных материалов. М.: Химия, 1974.