

Влагозащитные покрытия печатных плат

Н. Левкина¹, С. Ванцов, к. т. н.², А. Медведев, д. т. н.³

УДК 621.3.049.75:621.793 | ВАК 05.27.06

Влагозащитные покрытия – широкий спектр полимерных материалов, используемых для защиты электронной аппаратуры от внешних климатических и механических воздействий на протяжении всего срока эксплуатации. Они должны быть устойчивы к действию влаги, уменьшать потенциальную вероятность возникновения токов утечки, электрохимической миграции, роста дендритов и возникновения электрической дуги [1–5]. Эти требования особенно актуальны при уменьшении размеров электронных компонентов, ширины проводников и зазоров на печатной плате.

НАЗНАЧЕНИЕ ВЛАГОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Основными функциями, выполняемыми влагозащитными покрытиями печатных плат (ПП), являются:

- обеспечение устойчивости электроизоляции конструкций к условиям повышенной влажности и неизбежных поверхностных загрязнений в процессе эксплуатации;
- замедление коррозии за счет предотвращения образования водных электролитов между токоведущими цепями электронной аппаратуры, в частности под поверхностью покрытия;
- обеспечение механической усталостной долговечности паяных соединений безвыводных корпусов электронных компонентов поверхностного монтажа;
- предотвращение образования электродуги, коронного разряда и огней святого Эльма в высоковольтных конструкциях электронной аппаратуры в условиях пониженного атмосферного давления и повышенной влажности;
- создание дополнительной механической прочности крепления компонентов для обеспечения устойчивости к ударам и вибрации;
- предотвращение изменения параметров согласованных линий связи, возможное в случае увлажнения диэлектрических оснований печатных плат, работающих в высокочастотном диапазоне (СВЧ-платы).

ВИДЫ ВЛАГОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Все разнообразие влагозащитных покрытий сводится к двум разновидностям: однокомпонентные (без

растворителя – не растворы) и двухкомпонентные (растворы)*. Традиционно классификация покрытий строится по материалам, составляющим их основу. Сегодня на рынке широко представлены покрытия следующих типов:

- акриловые;
- эпоксидные;
- кремнийорганические (силиконовые);
- уретановые.

В последние годы получают распространение покрытия на основе ряда полипараксилиленов, отличающиеся очень высокой плотностью и обладающие комплексом свойств, который делает их наилучшим материалом для применения в некоторых видах электронных устройств, в том числе в приборах, работающих в неблагоприятных условиях внешней среды**.

Некоторые виды покрытий могут использоваться в смеси. Они представляют собой более сложные системы, представленные мономерами, олигомерами, пеногасителями, наполнителями, ПАВ, растворителями, а также эмульсиями на водной основе. Различные комбинации каждого из компонентов образуют смеси с различными типами отверждения.

Все полимеры, за исключением акриловых, отверждаются в результате реакции поликонденсации – необратимой реакции полимеризации с формированием поперечных связей. Эти композиции относятся к терморезистивным смолам, не поддающимся плавлению и растворению после полимеризации. Следует отметить, что терморезистивные смолы на основе эпоксидных,

1 МАИ (НИУ), магистр, levkina@mpsystems.su.

2 МАИ (НИУ), доцент, vancov@medpractika.ru.

3 МАИ (НИУ), профессор, medvedevam@bk.ru.

* До того, как в покрытие будет добавлен растворитель, его называют полуфабрикатом.

** В производственной практике покрытия перечисленных типов принято называть лаками.

уретановых и силиконовых полимеров имеют высокую термостойкость и механическую прочность. Этим обусловлено их преимущественное использование в качестве влагозащитных покрытий в электронной аппаратуре. Единственный их недостаток, хотя и преодолимый, – затруднение в удалении покрытия для проведения наладочных или ремонтных работ.

При формировании акриловых покрытий реакции полимеризации не сопровождаются образованием поперечных связей, образуются лишь длинные линейные полимерные цепи, что позволяет их отнести к термопластам, то есть к полимерам, способным плавиться и растворяться. Их удобно использовать в растворах, а отверждение проводить за счет испарения растворителя, поскольку такой процесс протекает у них значительно быстрее, чем у термореактивных лаков. УФ-отверждение ускоряет процесс полимеризации покрытий этого типа.

Акриловые покрытия легко растворяются во многих органических растворителях, что облегчает проведение наладочных и ремонтных работ. Акриловые материалы могут существовать как на водной основе, так и на основе химического растворителя.

В последнее время появились новые системы влагозащитных покрытий – гибридные покрытия, которые содержат два или более компонентов для улучшения укрывных свойств, например, ARUR – комбинация полиакрилатов и полиуретанов, сочетающая в себе полезные свойства того и другого компонента.

Для придания покрытиям приемлемой вязкости при нанесении на поверхность платы их часто разбавляют соответствующими им растворителями. В этом случае до начала процесса отверждения растворитель должен испариться, тогда композиционный материал со смоляной матрицей станет готов к процессу отверждения.

Использование лаков с растворителями связано с выделением летучих воспламеняющихся органических соединений, что требует соблюдения правил пожаробезопасности на производстве, которые, к сожалению, не всегда выполняются в полной мере. Альтернативой с точки зрения пожаробезопасности являются лаковые системы на водной основе.

Кроме того, органические растворители очень нежелательны с точки зрения экологической безопасности. Предприятия средней производительности ежегодно потребляют десятки тонн растворителей, которые, уходя после использования в окружающую среду, ухудшают экологическую ситуацию.

В настоящее время для влагозащитных покрытий как на водной основе, так и на базе растворителей в России не существует никаких нормативных документов, регламентирующих их воздействие на окружающую среду. Тем не менее в этом направлении предпринимаются

определенные усилия [6]. Так, в настоящее время разработано много систем лаков, в состав которых не входит растворитель, а отверждение осуществляется за счет воздействия ультрафиолетового или другого высокоэнергетического облучения.

Ниже рассмотрены основные характеристики основных типов влагозащитных покрытий.

АКРИЛОВОЕ ПОКРЫТИЕ (AR)

Акриловые покрытия легко наносятся и представляют собой осушенную пленку, которую можно легко удалить растворителем. Удаление небольшого участка покрытия при ремонте паяного соединения или замене компонента можно произвести с помощью местного нанесения растворителя на нужные участки. В некоторых случаях возможна пайка дефектного соединения без удаления покрытия.

Быстро осушаемые акриловые покрытия достигают оптимальных физических свойств в течение нескольких минут, обладают плеснестойкостью и долговечностью. Во время вулканизации акриловые материалы выделяют небольшое количество или вообще не выделяют тепла, которое может повредить теплочувствительные компоненты, не дают усадку при вулканизации и обладают высокой влагостойкостью. При повышенных температурах, например в области активно греющегося компонента, акриловые материалы размягчаются с большей легкостью по сравнению с другими полимерами.

Преимущества:

- хорошая влагостойкость;
- простая настройка вязкости за счет варьирования содержания растворителя;
- несложный процесс сушки (отверждение за счет испарения растворителя);
- отсутствие серьезных затруднений при проведении наладочных и ремонтных работ;
- высокий уровень флюоресценции в УФ-лучах, используемый для контроля качества.

Недостатки:^{*}

- необходимость постоянного контроля и управления концентрацией растворителя;
- высокая вероятность деструкции полуфабриката при повышенной температуре и влажности;
- усадка в пределах 3–10%, создающая угрозу разрушения хрупких компонентов;
- зависимость скорости и полноты отверждения от толщины пленки наносимого покрытия;
- необходимость соблюдения мер предосторожности при работе с компонентами, имеющими

^{*} При описании недостатков каждого из типов покрытий сначала приводятся общие недостатки, а затем – проблемы, возникающие при форсированном (УФ-излучением, нагревом) отверждении.

жесткие ограничения по допустимой температуре нагрева;

- высокий уровень испарений легколетучих веществ;
- легкая воспламеняемость, в сочетании с летучестью создающая высокий уровень пожароопасности;
- токсичность паров растворителя, приводящая к сложностям в обеспечении охраны труда;

при УФ отверждении:

- неполное отверждение на затененных участках;
- технологическая сложность: состояние отверждения зависит от спектра и интенсивности УФ-излучения;
- в ходе эксплуатации при повышенной температуре может стать очень хрупким;
- резкий запах, риск повреждения кожных покровов.

ЭПОКСИДНОЕ ПОКРЫТИЕ (ER)

Эпоксидные системы обычно поставляются отдельно в комплекте из двух составляющих: собственно смолы и отвердителя. После смешивания этих компонентов и отверждения они обеспечивают достаточную влагостойкость и хорошую прочность. Их фактически невозможно удалить химическим путем, поскольку любые растворы для удаления покрытия могут сильно повредить электронный компонент, на который оно нанесено, а также само основание платы из стеклоэпоксида. Единственным эффективным способом удаления эпоксидного покрытия при наладке или ремонте печатных узлов является прожигание лака с помощью горячего лезвия или паяльника.

Когда в лак из эпоксидной смолы вводят отвердитель горячего отверждения, он в исходном состоянии должен представлять собой раствор, в котором роль растворителя состоит в недопущении прямого контакта смолы и отвердителя. При обеспечении условий, исключающих испарение растворителя, этот раствор может находиться в неотвержденном состоянии неопределенно долго, что облегчает его применение в производстве. Такие покрытия отверждаются после испарения растворителя и последующего нагрева, например, до температуры выше 70 °С. Если воздействие высоких температур на собранную печатную плату по каким-то причинам противопоказано, возможно отверждение таких покрытий путем УФ-облучения.

Среди всех полимеров эпоксидная смола имеет наименьшую объемную усадку, порядка 3% – для других полимеров она может достигать 20%. Но и при такой малой усадке возникают большие напряжения, достаточные для разрушения хрупких электронных компонентов. Для предотвращения таких повреждений вокруг хрупких компонентов используют защитный эластичный слой – например, из

акрила, – компенсирующий усадку влагозащитного эпоксидного лака.

Процесс отверждения эпоксидных смол при повышенной температуре длится более трех часов, а при комнатной температуре – более семи дней, которые требуются для полного испарения растворителя.

При всем удобстве пользования заранее приготовленными растворами эпоксидных лаков следует помнить, что они имеют ограниченный срок годности, поскольку в практических условиях производства обеспечить их хранение без испарения растворителя проблематично.

Преимущества:

- нагревостойкость до 150 °С;
- высокие твердость и износостойкость;
- коэффициент термического расширения, близкий к стеклоэпоксидному основанию печатных плат;
- высокая температура стеклования;
- хорошие диэлектрические свойства.

Недостатки:

- интенсивный процесс отверждения, создающий риск неполного прохождения релаксационных процессов в получаемой пленке;
- затруднена регулировка вязкости раствора;
- высокая вероятность возникновения термомеханических и усадочных напряжений;
- затруднен ремонт изделий с таким покрытием;
- масса электронного компонента влияет на время и температуру процесса отверждения;

при УФ отверждении:

- неполное отверждение на затененных участках;
- технологическая сложность: состояние отверждения зависит от спектра и интенсивности УФ-излучения;
- в ходе эксплуатации при повышенной температуре может стать очень хрупким;
- резкий запах, риск повреждения кожных покровов.

КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКОЕ (СИЛИКОНОВОЕ) ПОКРЫТИЕ (SR)

Кремнийорганические покрытия незаменимы для электронной аппаратуры, которая подвергается в процессе эксплуатации циклическому воздействию экстремальных температур в широком диапазоне, например, в автомобильной электронике, где предельные рабочие температуры охлаждения и нагрева могут достигать –60 и +200 °С соответственно. Они обеспечивают высокую влагостойкость совместно с хорошей теплостойкостью, что вполне подходит для печатных узлов с такими тепловыделяющими компонентами, как резисторы. Для высокочастотных схем силиконовые покрытия наиболее приемлемы, поскольку они обладают низким коэффициентом рассеяния. Кремнийорганические лаки

образуют гибкие пленки, поэтому их используют для покрытия шлейфов и гибких плат. Если для отверждения силиконовых покрытий используют короткие экспозиции УФ-облучения, то в дальнейшем будет достигнута более глубокая полимеризация за счет поглощения влаги из окружающей среды.

Силиконовые покрытия могут быть достаточно большой толщины – более 0,3 мм, что обеспечивает хорошую укрывистость печатного монтажа. Следует помнить, однако, что толщина влагозащитного слоя оказывает влияние на допустимую частоту и скорость распространения сигналов в СВЧ-платах.

Преимущества:

- низкая влагопроницаемость;
- эластичность, обеспечивающая демпфирование при ударах и вибрации;
- высокие диэлектрические характеристики, уникальная электрическая прочность;
- устойчивость в широком диапазоне температур (обычно от -40 до +200 °С);
- хорошая влагостойкость, стойкость к солнечной радиации и УФ-облучению;
- высокая химическая инертность;
- низкая поверхностная энергия, способствующая хорошей растекаемости и подтеканию лака под компоненты;
- незначительное газовыделение;
- хорошая совместимость с биоматериалами (допускается использование в медицинской аппаратуре).

Недостатки:

- низкая износостойкость;
- короткий срок жизни полуфабриката;
- большой коэффициент термического расширения (300–350 ppm / K).

ПОЛИУРЕТАН (UR)

Полиуретановые покрытия могут быть одно- или двухкомпонентными. Двухкомпонентные покрытия (растворы) после испарения растворителя и отверждения обеспечивают хорошую влагостойкость, а также стабильные диэлектрические свойства. Им присуща химическая стойкость, что может рассматриваться и как основной недостаток, поскольку удаление лака будет затруднительной и дорогостоящей процедурой.

Нужно иметь в виду, что репутация полиуретановых соединений на ранних этапах их синтеза была испорчена их неустойчивостью, доходившей иногда до степени деструкционного процесса (вплоть до разжижения) в условиях повышенной влажности и высоких температур. Для новых типов полиуретанов подобный недостаток не характерен.

Полиуретановым пленкам присуща возможность пайки без удаления покрытий. Провода, например, могут

паяться без зачистки изоляции. Коричневые наплывы вокруг паяного соединения, которые могут образоваться при пайке через полиуретановое покрытие, ухудшают внешний вид изделия, но не снижают диэлектрические свойства пленки; на сами же места пайки, конечно, покрытие надо наносить повторно.

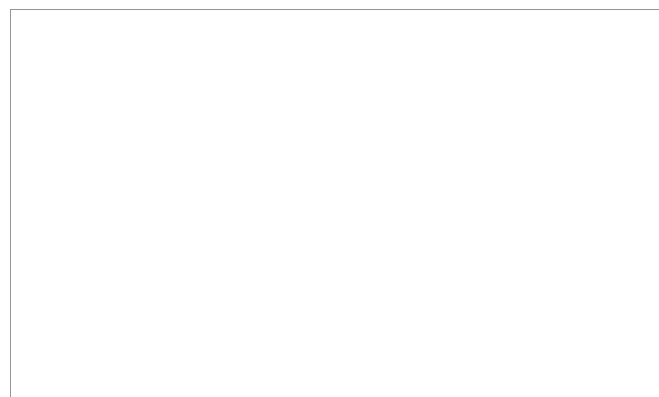
Однокомпонентные (без растворителя) полиуретановые покрытия легче наносятся, время их жизни между изготовлением и нанесением при комнатной температуре может составлять от 3 до 30 дней, что достаточно комфортно для применения в условиях производства. Для двухкомпонентных соединений (растворов) долговечность составляет от 30 мин до 3 ч. Длительность процесса оптимального отверждения полиуретановых покрытий при повышенной температуре может составлять 1–3 ч.

Преимущества:

- хорошие диэлектрические свойства;
- хорошая влагостойкость;
- низкая вероятность деструкции;
- высокая износостойкость;
- устойчивость к действию растворителей.

Недостатки:

- зависимость хода процесса отверждения и свойств покрытия от влажности среды;
 - длительное время полного отверждения путем испарения растворителя (порядка 30 суток в нормальных условиях);
 - угроза возникновения в пленке высокого разрушающего напряжения при термоциклировании;
 - высокая вероятность деструкции полуфабриката при повышенной температуре и влажности;
- при термическом отверждении:*
- процесс отверждения зависит от толщины пленки;
 - время процесса отверждения и его температура увеличиваются при наличии в составе электронного модуля массивных компонентов;
 - активное выделение легколетучих веществ;



- бурная реакция отверждения в присутствии воды и влаги воздуха, что ограничивает допустимую температуру теплового воздействия и, таким образом, увеличивает длительность процесса;

при УФ-отверждении:

- неполное отверждение на затененных участках;
- при повышенной температуре может стать очень хрупким;
- технологическая сложность: состояние отверждения зависит от спектра и интенсивности УФ-излучения;
- резкий запах, риск повреждения кожных покровов.

ПОЛИПАРАКСИЛИЛЕНОВОЕ (ПАРИЛЕНОВОЕ) ПОКРЫТИЕ (ХУ)

Эти покрытия транспортируются из реактора в рабочую камеру, осаждаются и полимеризуются в вакууме. Их свойства и технология нанесения обуславливают существенные отличия париленовых влагозащитных покрытий от лаков, описания которых приведены выше. Париленовая пленка осаждается с очень хорошей укрывистостью, то есть с равномерной толщиной, по всему контуру поверхности печатного узла, без изъянов и микропор. При незначительной толщине (порядка 10 мкм) она полностью закрывает края печатных проводников, острые углы выводов электронных компонентов и кромки электроизоляционных конструкций; последнее делает полипараксилиленовые покрытия очень эффективным материалом для использования в высоковольтной аппаратуре.

Полипараксилиленовая пленка имеет хорошие диэлектрические свойства, обладает низким коэффициентом теплового расширения, хорошей абразивной и высокой химической стойкостью. Эти свойства дают ей существенные преимущества по сравнению с остальными влагозащитными покрытиями, применяемыми для предохранения электронной аппаратуры от неблагоприятных воздействий окружающей среды, в особенности от высокой влажности с конденсатом, погружения в воду, соляного тумана, атмосферных загрязнений и контакта с агрессивными растворителями.

Полипараксилиленовая пленка – трудно удаляемое покрытие. Для его снятия при наладке и ремонте необходимо использовать абразив, эксимерный лазер, плазменное травление и некоторые другие методы, также довольно трудоемкие и/или требующие сложного оборудования.

В последнее время стали доступны фторированные разновидности полипараксилилена, которые сохраняют свои свойства при температуре выше 400 °С, имеют высокую устойчивость к высокоэнергетическому облучению, в частности к УФ-воздействию, и, что важно, низкую

диэлектрическую проницаемость. Еще одна уникальная особенность полипараксилиленов – они гидрофобны и не теряют этого свойства при эксплуатации в загрязненной среде – на их поверхность не налипают ионно-генные загрязнения.

Как уже сказано, формирование париленовых пленок происходит в вакууме, так что они проникают во все полости и щели, даже микронных размеров. Поэтому при нанесении полипараксилиленового покрытия поверхности, которые должны остаться свободными, следует тщательно маскировать. Это прежде всего относится к контактным поверхностям соединителей, реле и т. п.

Преимущества:

- низкий коэффициент влагопроницаемости;
- химическая инертность, хорошие барьерные свойства, устойчивость к органическим растворителям, кислотам и щелочам;
- высокая термоустойчивость (450 °С) и повышенная устойчивость к высокоэнергетическим и УФ-излучениям;
- низкое значение диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь;
- равномерная толщина покрытия независимо от геометрии детали, в том числе на острых кромках, отсутствуют точечные проколы, наплывы, перемычки;
- незначительное воздействие на окружающую среду.

Недостатки:

- требует использования сложного вакуумного оборудования;
- процесс не поддается встраиванию в поточное производство (загрузка / разгрузка камер и реактора, откачка вакуума);
- требует тщательного маскирования поверхностей, не подлежащих покрытию;
- сложность проведения ремонтных и наладочных работ.

ФТОРСОДЕРЖАЩИЕ ПОКРЫТИЯ

Покрытия нужны не только для защиты от влаги – ведь электронные системы управления часто находятся в прямом контакте с углеводородным топливом и маслами, рабочей жидкостью гидравлических систем, неполярными растворителями, кислотами и щелочами. В таких условиях очень хорошие результаты дают материалы покрытий, не относящиеся к категории лаков: фторуглерод и перфторполиэфир.

Фторуглерод (FC). Фторхимические поверхностные модификаторы являются гидро- и олеофобными покрытиями, которые уменьшают поверхностную энергию основания до 11–12 мН/м, так что вода, масла, жиры, а также такие растворители, как гептан, толуол и ацетон, свободно скатываются с этих поверхностей.

Фторхимические покрытия наносят в виде тонкого быстро сохнущего слоя, который при необходимости можно пропаять насквозь. Эти покрытия обычно формируются из фторуглеродных растворов, которые не воспламеняются, низкотоксичны и не летучи. Низкая вязкость и слабое поверхностное натяжение этих растворов позволяют им проникать в зазоры между корпусами электронных компонентов (BGA-корпуса, разъемы и т. п.) и платой.

Покрытия с фторхимическими поверхностными модификаторами не поддаются воздействию большинства органических растворителей, но для них характерна крайне незначительная толщина и слабая устойчивость к абразивному воздействию. К технологическим проблемам, создаваемым этими покрытиями, можно отнести серьезное затруднение процедуры контроля нанесения, поскольку его пленка настолько прозрачна, что трудно различить ее присутствие или отсутствие на поверхности печатного узла. Но более существенным его недостатком является слабая нагревостойкость: если рабочая температура превышает 40 °С, покрытие начинает испаряться.

Перфторэфир. Перфторполиэфиры термостабильны до температур не менее 300 °С, а перфторполиэфиры типа фреон Е – даже до 410 °С. Эти жидкости имеют экстремально низкое поверхностное натяжение (16 мН/м), поэтому хорошо смачивают поверхность, вытесняя с нее все посторонние вещества. Сополимеры на основе перфторэфира и кремнийорганического полимера имеют улучшенные низкотемпературные характеристики, стойкость к длительному нагреванию, высокую адгезию при заливке, превосходные электрические характеристики и ионную чистоту.

Преимущества:

- низкое водопоглощение и влагопроницаемость;
- хорошая устойчивость к растворителям, маслам и простым кислотам;
- низкие диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери;
- низкая поверхностная энергия, что позволяет проникать в тонкие зазоры;
- высокая температура стеклования.

Недостатки:

при нанесении осаждением из растворов:

- ограниченный ряд растворителей, пригодных для приготовления растворов;
- плохая растворимость, что затрудняет формирование пленок определенной толщины;
- необходимость специальной обработки поверхности для обеспечения адгезии пленки;
- во многих случаях возникает потребность в дополнительной термообработке при температуре стеклования;

при нанесении вакуумным осаждением:

- плохая устойчивость к действию некоторых кислот и щелочей;
- низкая износостойкость;
- требуется давление 10⁻⁵ мм рт. ст. или ниже;
- для улучшения адгезии может потребоваться специальная обработка поверхности;
- может потребоваться дополнительная термообработка при температуре стеклования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время рынок предлагает большое разнообразие материалов влагозащитных покрытий, но все они сводятся к ограниченному ряду систем полимеров с характерными для них свойствами. По существу, ни один из них не может быть признан универсальным, закрывающим все проблемы влагозащиты и технологий нанесения покрытий. Покрытия приходится выбирать применительно к реальным условиям эксплуатации и производства по критериям, предложенным в этой статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. IPC-HDBK-830. Guidelines for Design, Selection and Application of conformal Coating. October 2002.
2. **Ellou J. L., Paladino L.** Mitigativy Corrosion of Electronics // The Open Corrosion Journal. 2009. 2.
3. **Keeping J.** Process Development and Optimization Using a Newly Designed Conformal Coating Test Vehicle // SMTAI, October 2007.
4. **Чуйкова Л.** Влагозащита радиоэлектронной аппаратуры // Компоненты и технологии. 2007. № 5. С. 164–167.
5. **Белик Г. А., Линецкий Б. Л., Нерето М. О., Шихов А. И.** Изучение влияния нанопроводимости диэлектриков печатных узлов на работоспособность цифровой электронной аппаратуры // Технологии ЭМС. 2014. № 1. С. 40–45.
6. **Ванцов С. В., Васильев Ф. В., Медведев А. М., Сокольский М. Л.** Промышленная экология авионики / Под ред. С. В. Ванцова. – М.: Изд-во МАИ, 2015.