Сравнение конформных покрытий: кремнийорганические, уретановые и париленовые

Конформное покрытие — это тонкий прозрачный полимерный слой, наносимый на поверхности печатных узлов для защиты от воздействия внешних факторов. Термин «конформный» происходит от латинского conformis — «сходный», «подобный», то есть определяющий возможность покрытия повторить форму защищаемого печатного узла.
Кремнийорганическое, уретановое и париленовое — какое из этих конформных покрытий лучше? В статье подробно рассматриваются их достоинства и недостатки.

Шон Хорн (Sean Horn)

Под редакцией Татьяны Кузнецовой, к. х. н.

Перевод: Артем Вахитов

На сегодня наиболее популярны два типа конформных покрытий: кремнийорганические и уретановые. Выбор между ними делается по самым разным соображениям, но какое из них объективно лучше? И что можно сказать о париленовых конформных покрытиях — прозрачных полимерных покрытиях, осаждаемых в вакууме из газовой фазы, которые могут равномерно наноситься на поверхности практически любого состава, качества и формы, в том числе стекло, металлы, бумагу, смолы, пластмассы, керамику, ферриты и кремний?

Хотя выбор в конечном счете зависит от применения, рассмотрим сильные и слабые стороны каждого из этих типов покрытий.

Кремнийорганические конформные покрытия

У многих типичных кремнийорганических покрытий номинальная рабочая температура в условиях долговременной эксплуатации составляет +200 °С. Это гораздо выше, чем у большинства уретановых (+125 °С). Некоторые кремнийорганические покрытия, предназначенные для применения в условиях сверхвысоких температур, имеют номинальную рабочую температуру, доходящую до +600 °С. На кремнийорганические покрытия существует большой спрос в автомобилестроении, поскольку температура в двигательном отсеке может достигать +175 °С.

Дополнительное преимущество кремнийорганического конформного покрытия — великолепная влагозащита, поэтому оно используется в изделиях, претерпевающих чрезвычайно сильные перепады температур, которые приводят к чрезмерно обильному влагообразованию. Другие конформные покрытия в этих условиях отказывают в течение часов или дней, но кремнийорганические, особенно нанесенные толстым слоем, выдерживают. Одно из конкретных применений этого типа покрытий — обогреватели с электронным управлением, предназначенные для эксплуатации в климатических условиях Арктики. Они нагреваются почти до +65 °С, а затем охлаждаются до окружающей температуры, которая может доходить до –40 °С. Столь сильный перепад температуры происходит очень быстро, отчего образуется большое количество влаги. Применение других покрытий, например уретановых, приводит к отказам печатных узлов. Единственная проверенная альтернатива — кремнийорганика.

Кремнийорганические покрытия также относятся к числу наиболее легких в нанесении и доработке. Благодаря невысокому, как правило, содержанию растворителей эти покрытия ложатся гладким слоем, который очень быстро отверждается — примерно за 1 ч при комнатной температуре. Наконец, такие качества кремнийорганических покрытий, как гибкость, мягкость и относительно низкая стойкость к растворителям, делают их пригодными для печатных узлов, требующих дополнительной обработки после нанесения покрытия. Эта гибкость позволяет минимизировать трудозатраты, не жертвуя целостностью покрытия.

Нерекомендованные применения

Поскольку кремнийорганические покрытия необходимо наносить более толстым слоем (целевая толщина покрытия составляет 0,05–0,21 мм), чем конформные покрытия других типов, разумно поискать иные варианты, если изделие имеет строгие допуски на зазоры или если паяные соединения неспособны выдержать механические напряжения, возникающие под действием толстого слоя покрытия.

Существуют, в частности, такие марки кремнийорганических конформных покрытий:

- HumiSeal 1C49;
- HumiSeal 1C49LV;
- HumiSeal 1C51;
- HumiSeal 1C55;
- Dow Corning 1-2577;
- Dow Corning 3-1753;
- Dow Corning 3-1765;

- Dow Corning 3-1744;
- Dow Corning 3-1953;
- Dow Corning 3-1965;
- Dow Corning 3-1944;
- MG Chemicals 422B;
- Peters DSL 1705 FLZ;
- Peters DSL 1706 FLZ;
- Electrolube SCC3;
- Electrolube SCC4.

Уретановые конформные покрытия

Уретановые (UR) конформные покрытия (рис. 1) характеризуются высокой стойкостью к химическим растворителям, уступая в этом отношении только париленовым. Соответственно, целесообразно рассматривать возможность применения уретановых покрытий в изделиях, которые должны выдерживать продолжительное влияние сильнодействующих химических растворителей.

Долгосрочные исследования NASA показали, что уретановые конформные покрытия — один из немногих эффективных способов, препятствующих росту «усов» олова. Поскольку на сегодня неизвестен способ полностью исключить подобный недостаток, необходимо выбрать надлежащую стратегию противодействия данному явлению. Уретановые покрытия — хорошая отправная точка в этом смысле.

Уретановые конформные покрытия целесообразно также рассматривать для применения в изделиях, претерпевающих непосредственный механический износ, поскольку уретановые смолы весьма тверды и стойки к нему: по твердости они уступают только эпоксидным конформным покрытиям, будучи значительно легче в доработке.

Нерекомендованные применения

Уретановые конформные покрытия малопригодны для изделий, эксплуатируемых в условиях сильной вибрации. Ввиду механической прочности и стойкости к истиранию, которые обычно свойственны уретановым покрытиям, сильная вибрация может в конечном итоге привести к нарушению целостности этих жестких покрытий. Более удачным выбором будет полностью конформное гибкое покрытие — например, париленовое.

Если изделие будет подвергаться воздействию высоких температур, уретановое покрытие не обеспечит необходимой защиты. Ведущие уретановые покрытия, такие как HumiSeal 1A33, обеспечивают защиту при температуре до +125 °C.

В настоящее время применяются, в частности, следующие марки уретановых конформных покрытий:

- HumiSeal 1A33;
- HumiSeal 1A20;
- HumiSeal 1A27;
- HumiSeal 2A64;
- HumiSeal 1A34;
- Peters SL 1301 FLZ;
- Peters SL 1301-Eco-BA FLZ;
- Hysol PC18M;
- CONATHANE CE-1155-35;

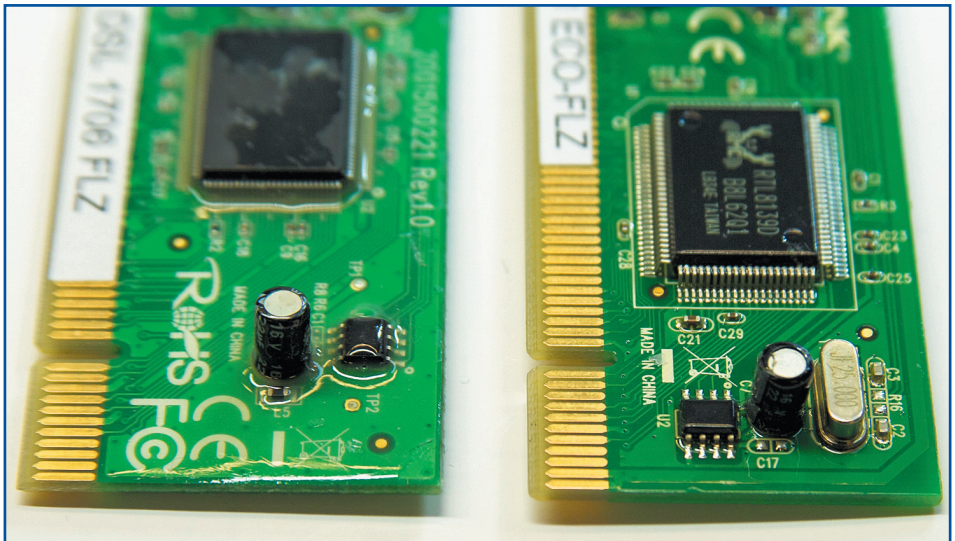

Рис. 1. Покрытия: силиконовое (слева) и уретановое (справа)

- CONAPCE-1170;
- CONATHANE CE-1164;
- Techspray Fine-L-Kote;
- MG Chemicals 4223;
- Electrolube PUC.

Париленовые конформные покрытия

Париленовые полимеры — поликристаллические и линейные по своему строению, обладают превосходными барьерными характеристиками, в высшей степени инертны химически и, благодаря технологии осаждения, могут равномерно наноситься на поверхности практически любого состава, качества и формы.

Заметить тонкое и прозрачное париленовое покрытие на поверхности печатного узла довольно трудно (рис. 2), его можно увидеть только по легкой матовости поверхности или же поцарапав покрытие острым скальпелем.

Париленовые покрытия отличаются от других тем, что наращиваются непосредственно на поверхности изделия при комнатной температуре. Благодаря отсутствию жидких фаз они являются по-настоящему конформными, имеют равномерную контролируемую толщину и полностью свободны от дефектов типа «булавочный прокол» при толщине более 0,5 мкм. Фактически париленовое покрытие способно полностью заполнять зазоры шириной всего 0,01 мм.

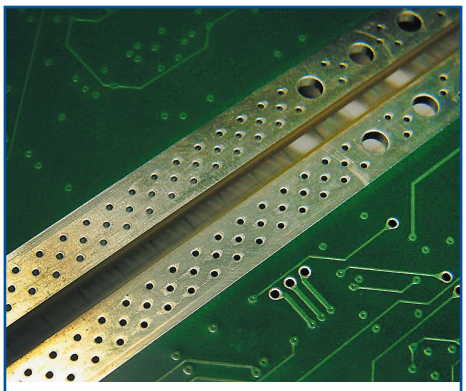

Рис. 2. Плата без покрытия (сверху), плата, покрытая париленом (снизу)

Помимо отличных электрических характеристик, таких как низкая диэлектрическая проницаемость, малые потери, благоприятные высокочастотные свойства, хорошая электрическая прочность и высокое удельное объемное и поверхностное сопротивление, париленовые покрытия отличаются хорошей термостойкостью и могут эксплуатироваться без значительного ухудшения физических характеристик в течение 10 лет при температуре +80 °C на воздухе и при температуре свыше +200 °C в бескислородной среде.

Париленовые покрытия часто наносят на основы или материалы, не допускающие наличия каких-либо пустот в защитном покрытии. В ходе эксплуатации многие изделия такого рода взаимодействуют с агрессивными химическими веществами, влажной средой или даже человеческим организмом. Нередко эти изделия представляют собой устройства ответственного назначения, у которых не должны изменяться эксплуатационные характеристики под влиянием внешних факторов. Если изделия требуют столь надежной защиты от воздействия среды, париленовые покрытия — единственный разумный выбор.

Недостатки париленовых покрытий

При всех преимуществах у париленовых покрытий есть и ряд недостатков по сравнению с другими конформными покрытиями. Один из важных факторов — это, как правило, более высокая стоимость, обусловленная множеством причин, в числе которых сама технология, используемое сырье и трудозатраты на подготовку изделия к нанесению покрытия. Чаще всего (хотя и не во всех применениях) цена изделия с париленовым покрытием будет выше, чем с покрытием, наносимым из жидкой фазы.

Технологический процесс нанесения париленовых покрытий предусматривает обработку изделий партиями. Отсюда следует, что объем пространства в вакуумной камере для каждой установки по нанесению покрытий ограничен. Цель состоит в том, чтобы максимизировать количество изделий в камере. Если оно ниже

оптимального, цена за штуку может оказаться значительно выше.

Кроме того, используется довольно дорогостоящее сырье — дипараксилилен и его производные, цена за который варьируется в диапазоне примерно от $450 более чем до $20 тыс. за 1 кг. Поскольку париленовое покрытие осаждается из паровой фазы, оно наносится на все поверхности, включая и те, что покрывать не нужно,— например, на внутреннюю поверхность вакуумной камеры. Поэтому технология нанесения париленовых покрытий по природе своей неэффективна и сопряжена с непроизводительным расходом материалов, что повышает итоговую стоимость для покупателя.

Подготовка изделия к нанесению париленового покрытия, в частности маскирование, может быть трудоемким делом. Ввиду того что париленовое покрытие наносится из паровой фазы, оно распространяется буквально всюду, куда способен проникнуть воздух. Операторы и специалисты службы контроля качества должны принять соответствующие меры, прежде чем приступить к выполнению данной процедуры, чтобы все участки поверхности, на которые оно наноситься не должно, действительно остались свободными.

Серьезная проблема, с которой нередко сталкиваются отдельные крупносерийные производители,— ограниченная пропускная способность установок по нанесению париленовых покрытий. Длительность цикла работы такой установки может составлять от 8 до 24 ч и более. Из-за ограниченного объема пространства в вакуумной камере за один цикл может быть обработано фиксированное количество изделий. Это, вкупе с высокими капитальными затратами на новое оборудование, может привести к срыву графиков у исполнителя работ и клиента.

Наконец, еще один недостаток париленовых покрытий — плохая адгезия ко многим металлам. Эти покрытия всегда плохо адгезировали с золотом, серебром, нержавеющей сталью и другими металлами. Многие изготовители печатных плат используют золото в своей продукции из-за его высокой электропроводности. Существует ряд способов, позволяющих существенно улучшить адгезию к таким металлам, но эти методы сопряжены с высокими расходами на материалы или трудозатратами и могут также значительно повысить стоимость изделия.

Выводы

Применение кремнийорганических, уретановых или париленовых конформных покрытий имеет целый ряд преимуществ. Очевидно, что хоть какое-то покрытие лучше, чем никакого. Но задача состоит в том, чтобы подобрать конформное покрытие, чьи сильные стороны соотносятся с потенциальными проблемами изделия так, что обеспечивают ему наилучшую защиту. Только определив эти проблемы и пути их решения, можно выбрать оптимальный вариант. Если до конца не ясно, какое покрытие лучше, возможно, стоит обратиться за консультацией к специалисту.

Противодействие росту «усов» олова и конформные покрытия

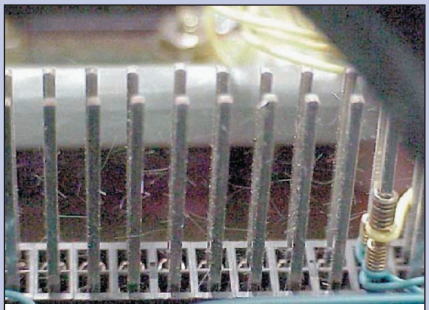

Рис. 3. «Усы» олова на разъеме

«Усы» олова — это проводящие электрический ток кристаллические структуры, иногда вырастающие на поверхностях, имеющих оловянное финишное покрытие (особенно гальванически осажденное). Типичная длина «усов» составляет 1–2 мм, но наблюдались также усы длиной свыше 10 мм. Зафиксированы случаи отказов электронных систем из-за коротких замыканий, вызванных «усами» олова, которые создают перемычки между близко расположенными элементами электрических цепей, находящимися под разными потенциалами.

Иногда «усы» путают с более широко известным феноменом — дендритами, нередко образующимися в результате процессов электрохимической миграции. Поэтому здесь важно подчеркнуть, что «усы» и дендриты — два совершенно разных явления. Как правило, «ус» олова имеет вид очень тонкого одиночного нитевидного или волосовидного отростка, направленного наружу от поверхности (в направлении оси Z). Дендриты же формируют узоры в виде листьев папоротника или снежинок, растущих вдоль плоскости поверхности (плоскость XY), а не наружу. Механизм роста дендритов хорошо изучен и требует присутствия влаги того или иного типа, способной растворять металл (например, олово) с образованием раствора, содержащего ионы этого металла, которые затем подвергаются электромиграции под действием электрического поля. Точный механизм образования «усов» не установлен, но известно, что он не требует ни растворения металла, ни присутствия электрического поля.

По данным NASA, механизмы роста «усов» олова изучаются уже на протяжении многих лет. Единого общепринятого объяснения этому явлению не выработано. Одни теории предполагают, что рост «усов» олова может происходить вследствие релаксации механических напряжений (особенно напряжений сжатия) в поверхностном слое олова, другие объясняют его процессами рекристаллизации и аномального роста зерен, изменяющими структуру зерна олова при возможном (но не обязательном) влиянии остаточных напряжений в пленке олова.

Являются ли «усы» олова источником проблем?

Специалисты NASA отмечают, что «усы» олова создают серьезный риск снижения надежности электронных узлов. Зафиксирован ряд случаев, когда «усы» олова приводили к отказам наземных и космических систем. На сегодня имеются свидетельства по крайней мере о трех случаях коротких замыканий из-за «усов» олова, повлекших полный отказ коммерческих спутников на орбите. «Усы» олова становились также причиной отказов медицинских устройств, боевых комплексов, энергетических установок и бытовой электроники.

В связи с «усами» олова следует рассматривать четыре основных вида рисков:

1. устойчивые короткие замыкания в низковольтных цепях с низким импедансом;
2. кратковременные короткие замыкания;
3. дуговой разряд в парах металла;
4. мусор и загрязнения.

Из этого списка часто самым разрушительным оказывается дуговой разряд в парах металла. Он происходит, когда «усы» олова инициируют короткое замыкание в среде с сильными токами и высокими напряжениями.

К сожалению, пока что не известно способа полностью исключить рост «усов» олова — можно только использовать те или иные стратегии противодействия, позволяющие ограничить неблагоприятные для изделия последствия.

Жизнеспособная стратегия противодействия росту «усов» олова

В 1998 году произошел отказ на орбите коммерческого спутника Galaxy IV из-за дугового разряда в парах металла, который был вызван «усами» олова на предположительно оловянно-свинцовых поверхностях. Впоследствии было подтверждено, что соответствующие поверхности состояли из чистого олова, невзирая на сертификаты соответствия, в которых утверждалось иное. Этот отказ привел к многодневному перерыву в работе пейджинговых служб.

По следам отказа спутника Galaxy IV специалисты NASA провели исследование для оценки эффективности уретанового конформного покрытия в качестве средства противодействия росту «усов». Для эксперимента было выбрано полиуретановое конформное покрытие марки Uralane 5750 (Arathane 5750) как наиболее широко применяемое в аппаратуре космического назначения.

По результатам этого исследования нанесение конформного покрытия было признано жизнеспособной стратегией противодействия росту «усов» олова. Более тонкие слои конформного покрытия были неспособны предотвратить прорастание «усов», но слой уретановой смолы Arathane 5750 толщиной 50 мкм оказался достаточно прочным, чтобы исключить прорастание «усов» сквозь покрытие и устранить связанные с этим потенциальные проблемы.