

Методика исследования и испытаний влагозащитных покрытий, паяльных паст и технологических процессов

Тема воздействия окружающей среды на электронные изделия и обусловленных ее влиянием отказов в последнее время привлекает все больше внимания. Электронные узлы различного оборудования подвергаются воздействию усиливающихся неблагоприятных условий окружающей среды.

Помимо испытаний, связанных с чисто температурным воздействием, следует также проводить испытания, которые включают, с одной стороны, термоциклирование в широком диапазоне температур, создающее термомеханическую нагрузку, а с другой — температурное воздействие, усугубленное воздействием влаги. Следует понимать, что воздействие влажности отличается от воздействия конденсации.

При конденсации могут возникать осмотические процессы, которые запускают химические и физические процессы, чего обычно не происходит в условиях высокой влажности.

В этом случае чисто физические процессы могут сопровождаться химически необратимыми процессами деградации.

**Манфред Суппа
(Manfred Suppa)**

**Под редакцией
Татьяны Кузнецовой,
к. х. н.**

О климатических факторах

Ряд климатических факторов, воздействующих на электронный узел на протяжении его срока службы, может несколько отличаться от общепринятых представлений о климате. Это такие факторы, как:

- температура;
- влажность воздуха;
- конденсация (точка росы);
- дождь;
- давление воздуха, воздушные потоки, ветер;
- химически активные газы (включая NO_x , SO_2 , H_2S);
- УФ-излучение (солнечный свет).

В данном исследовании рассматриваются эксплуатационные воздействия, связанные с первыми тремя факторами, и их влияние на надежность электронных узлов. С физической точки зрения воздействие дождя имеет последствия, очень схожие с последствиями конденсации.

Климатические факторы, влияющие на работоспособность электронного узла, оценить труднее, поскольку, кроме «внешнего» климата (погоды), необходимо еще измерить и учесть влияние микроклимата, который часто усугубляет нагрузки. Примерами в том же автомобиле могут служить внутреннее пространство дверей (очень высокие климатические нагрузки: температура около $+70^\circ\text{C}$, относительная влажность около 100%), педальный узел (высокая влажность) и моторный отсек (высокие тепловые нагрузки и риск попадания брызг воды). Помимо постоянных атмосферных воздействий, электронный узел испытывает также воздействие, связанное с их изменениями. Это могут быть последствия смены времени суток или сезона, а также гроз и проливных дождей. В автомобиле непосредственные воздействия могут быть обусловлены [3, 11]:

- включением и выключением кондиционера;
- регулированием температуры в салоне;
- переменным нагревом двигателя в результате управляющих воздействий водителя;
- проникновением влаги (снега, воды) в салон при открытии дверей.

В целом можно отметить, что атмосферные воздействия в нормальных климатических условиях всегда сопровождаются воздействием влаги. Влияние влажности воздуха будет рассмотрено в следующем разделе.

Влага (вода), попадающая на поверхность или внутрь различных материалов, например полимеров или металлов, может вызывать как обратимые, так и необратимые изменения. При повышении температуры содержащих влагу материалов возникает тенденция к росту энтропии, то есть к необратимым изменениям в этих материалах. Влияние влажности подробно рассматривается ниже.

Еще в 1991 году Лемэр и соавторы писали, что «химическая роль воды в совокупности процессов, вызванных воздействием погодных факторов, еще до конца не изучена» [1]. Камаль и Саксон [2] подчеркивают, что вода может вызывать в полимерах по меньшей мере три вида эффектов, приводящих к деградации:

- Потеря связи между полимером и подложкой или пигментом (наполнителем) — физические механизмы.
 - Образование гидроксильных радикалов под воздействием солнечного света (УФ-излучения) — фотохимические механизмы.
 - Гидролиз (расщепление), например, сложноэфирных или амидных связей — химические механизмы.
- Четвертый возможный механизм — это образование ионов и увеличение подвижности носителей

электрического заряда. Последний механизм играет роль спускового крючка, особенно в процессах электрохимической коррозии. Этот аспект будет подробно рассмотрен далее.

Воздействие влажности на электронные узлы

Под влажностью воздуха обычно понимают относительную влажность. Как правило, этот параметр важен, но в контексте химических и физических процессов зачастую более значимую роль играет абсолютная влажность. Дадим определения этих двух понятий.

Относительная влажность — это выраженная в процентах степень насыщения воздуха парами воды при данной температуре (то есть отношение давления паров воды в воздухе к максимально возможному давлению паров воды в воздухе при данной температуре). В английском языке (как и в отечественной научной литературе) применяется аббревиатура RH (от англ. *relative humidity* — «относительная влажность»).

- Если относительная влажность равна 50%, содержание водяного пара в воздухе вдвое меньше максимума при данной температуре.
- Если относительная влажность равна 100%, воздух полностью насыщен водяным паром.
- Избыточная влага, превышающая 100%-ный уровень, уже не может находиться в воздухе в виде паров, а выпадает в виде капель воды или водяного тумана.

Абсолютная влажность — это общая масса водяного пара в 1 м³ воздуха. Она измеряется в граммах на кубический метр (г/м³).

Когда влажный воздух нагревается, относительная влажность резко падает, а абсолютная остается неизменной. Течение многих физических процессов определяется именно абсолютной влажностью, выраженной через парциальное давление водяного пара. С другой стороны, точка росы (температура конденсации) непосредственно связана с относительной влажностью: в точке росы воздух насыщен водяным паром (относительная влажность равна 100%) и происходит конденсация. Точка росы — это температура, при которой воздух насыщается водяным паром, при опускании температуры ниже точки росы происходит конденсация. В точке росы относительная влажность воздуха равна 100%. Точку росы часто указывают в относительной форме — как разность между фактическим значением температуры и температурой точки росы.

Покрывание электронного узла и содержащийся в атмосфере водяной пар находятся в состоянии равновесия, которое определяется парциальным давлением (давлением только водяного пара). Общее давление атмосферного воздуха равно смеси парциальных давлений компонентов — азота, кислорода, углекислого газа, водяного пара и пр. Поскольку ни один полимер не является непроницаемым для водяного пара (!), в любом полимере всегда содержится некоторый процент воды. С увеличением температуры и/или влажности этот процент растет. Способность распространенных полимеров, применяемых в электронике, к поглощению воды приведена в таблице 1.

Таблица 1. Взаимодействие некоторых распространенных веществ с водой [8]

	Поглощение воды в % (погружение на 24 ч при комнатной температуре)
Эпоксидные соединения	0,5–1
Кремнийорганические соединения	< 0,3 (в основном < 0,1)
Полиуретаны	0,6–0,8
Полиакрилаты	около 0,3
Полиамиды	2–8,5

Внешним проявлением этого может служить так называемый эффект попкорна (деформация поверхностей, расслоение под воздействием захваченной влаги, растрескивание герметичного корпуса компонентов, вздутие) в процессе пайки.

В этих случаях разность между давлением воды, которую впитал полимер, и парциальным давлением водяного пара в атмосфере становится причиной резкого вскипания воды в полимере, приводящего к растрескиванию или вздутию полимера. Но при конденсации дело обстоит иначе.

Физические эффекты, связанные с воздействием влажности (воздуха) на полимеры, а следовательно, и электронные узлы, можно разделить на эффекты адсорбции и абсорбции влаги (воды). Если говорить простым языком, адсорбция — это поглощение воды, происходящее только на поверхности полимера (например, при конденсации влаги), тогда как абсорбция — явление, проходящее в объеме (идет поглощение паров воды полимером за счет разности концентраций воды внутри полимера и в воздухе).

Под адсорбцией понимается образование на поверхности металла или пластмассы водяной пленки, которая может привести к снижению поверхностного удельного сопротивления. Адсорбция, в отличие от абсорбции, не влияет на изоляционные свойства толщи материала. Абсорбцией называется поглощение одного материала другим.

В практических ситуациях, связанных с воздействием влаги на электронные узлы, оба эти эффекта возникают одновременно. Водяная пленка есть даже на «сухих» поверхностях! Отсюда вопрос: насколько сухими в действительности являются сухие поверхности? Ответ может дать, например, сканирующий туннельный микроскоп [4]. В очень сухой атмосфере с относительной влажностью менее 50% образуется водяная пленка толщиной около 10 нм в форме капель или островков. Пленка такой толщины уже способна взаимодействовать с гигроскопичными (поглощающими воду) загрязнениями на поверхности. При относительной влажности 50% и выше толщина водяной пленки резко возрастает и может даже превысить 60 нм. Следует отметить, что большинство электронных узлов эксплуатируется в условиях, не требующих нанесения защитного покрытия.

У металлических поверхностей с высокой гидрофильностью (например, слоев оксидов металлов) адсорбция гораздо сильнее. Водяная пленка толщиной 80 нм образуется на них

всего при 50%-ной влажности, а с дальнейшим повышением влажности толщина пленки быстро растет более чем до 100 нм. Таким образом, при относительной влажности выше 50% поверхность металла покрывается сплошной водяной пленкой! При толщине пленки более 10 нм можно ожидать, что она будет проявлять свойства «обычной» воды. Фактически она уже ведет себя таким образом: на поверхности могут начаться процессы растворения солей и ионного обмена [5, 6]. При влажности воздуха выше 80% всегда существует скрытый риск конденсации, а температура точки росы может становиться ниже на 2–3 °С.

Загрязнение может значительно снижать температуру точки росы: так, при загрязнении хлоридом натрия (NaCl) конденсация наступает уже при относительной влажности 75%. Для каждого материала существует критическое значение относительной влажности — это значение влажности при данной температуре, по достижении которого вещество начинает поглощать влагу из атмосферы. Критическая относительная влажность является постоянной материала [12, 13].

Электрическая изоляция при воздействии влаги

Описанные выше процессы адсорбции, с высокой вероятностью ослабляющие изоляцию между двумя точками, между которыми существует разность потенциалов в электронном узле, можно надежно исключить, нанеся подходящее влагозащитное покрытие. При этом адсорбция действительно будет по-прежнему происходить, но на поверхности защитного покрытия, не влияя на изоляцию. То же самое относится и к конденсации: температура и влажность воздуха существенно влияют на электрическую изоляцию.

Водопроницаемость полимера не означает, что его не следует использовать в качестве изоляционного материала. Необходимо лишь, чтобы диффузная влага не накапливалась на границе перехода «полимер – печатная плата» или в толще полимера. Отсюда вытекают требования, которые относятся к печатной плате. Электропроводящие загрязнения, например соли (в частности, отпечатки пальцев), определенно способны ослабить границу перехода за счет образования островков влаги.

Иначе обстоит дело, когда вода накапливается в толще полимера. Количество воды определяется как количеством полярных групп в структуре полимера, так и степенью поперечной сшивки полимера. Эксперименты по диффузии показали, что подвижность зависит не только от температуры, но и от количества воды, уже поглощенной полимером. Если воды в полимере немного (и, соответственно, мало полярных групп), небольшое количество молекул воды свободно перемещается внутри полимера, незначительно взаимодействуя с ним, и коэффициент диффузии относительно высок. С ростом содержания воды (увеличением количества полярных групп) ее молекулы собираются в кластеры, интенсивность взаимодействия растет, а подвижность (и, следова-

Таблица 2. Взаимодействие некоторых распространенных веществ с водой [8]

	Проницаемость для водяного пара (+37 °С, 90%, в г/м ² при d = 25 мкм)
Эпоксидные соединения	20–37,2
Кремнийорганические соединения	594–1872
Полиуретаны	66,7–134,9
Полиакрилаты	550

тельно, коэффициент диффузии), как правило, снижается. Простое скопление изолированных друг от друга молекул воды довольно безобидно, в то время как образование кластеров или заполненных водой переходов имеет серьезные последствия. В этих кластерах создаются благоприятные условия для переноса электрического заряда, что приводит к резкому снижению сопротивления изоляции. Такая захваченная гидратационная вода, которая часто проявляется в виде побеления лаковой пленки, электрически и осмотически активна.

Высокую проницаемость материала для водяного пара не следует путать (!) с абсорбцией воды. Поясним этот момент на примере кремнийорганических соединений. Несмотря на высокую проницаемость для водяного пара (табл. 2), они поглощают на порядок меньше воды по сравнению со стандартными органическими полимерами (табл. 1). В этом состоит одно из преимуществ кремнийорганических покрытий в условиях высоких влажностных и температурных нагрузок. Они обеспечивают намного большую стабильность электрических характеристик.

Проницаемость полимерной пленки для молекул воды привлекает внимание к поверхности печатной платы, на которую наносится покрытие. Если на ней уже имеется какое-либо влагочувствительное загрязнение, его нельзя будет просто изолировать и обезвредить. Водорастворимые загрязнения — одно из потенциальных слабых мест. На самом деле защитный эффект покрытия можно подтвердить только для такого печатного узла, который собирают в как можно более закрытом технологическом процессе [14].

Для изучения характеристик изоляции в различных климатических условиях проводятся циклические испытания в климатической камере при разных сочетаниях температуры и влажности: +25 °С/50%; +35 °С/90%; +65 °С/90% и +85 °С/85%. Измерение производится через 1 ч, 1 сутки и до 3 суток. По окончании цикла оценивается внешний вид, липкость покрытия и сопротивление изоляции при комнатной температуре (предполагается относительная влажность 50%). Это испытание позволяет изучать характеристики защитных покрытий и/или технологических процессов их нанесения (качество очистки поверхности, степень отверждения полимерного покрытия и т. п.).

Более того, оно позволяет заключить, что постоянное снижение влажности и сопротивления изоляции в течение 3 суток при +85 °С/85% указывает на стабильность этих параметров при типовом испытании с вы-

держкой в 7 суток при +65 °С/90%. В частности, это помогает быстро выявлять основные проблемы, связанные с совместимостью материалов и/или с технологическими процессами, а также тенденции к возникновению таких проблем. Кроме того, полимерные материалы могут характеризоваться снижением электрического сопротивления при повышенных температурах. В этом контексте для различных параметров, зависящих от температуры (например, для адсорбции, абсорбции или диффузии влаги), определяются тенденции к их изменению.

Проницаемость — это способность пленочного покрытия пропускать влагу (воду) из паровой фазы (атмосферы) при различных климатических условиях. Процесс переноса вещества через твердое тело состоит из следующих этапов:

- адсорбция проникающего вещества с одной стороны;
- поглощение твердым телом;
- диффузия через твердое тело (в направлении снижения концентрации).

Идеальный процесс описывается законом Генри:

$$c = S \times p,$$

где c — концентрация поглощаемого вещества; S — растворимость/постоянная сорбции полимера; p — парциальное давление пара над полимером.

Атмосферная влажностная нагрузка — это преобладающее в воздухе давление водяного пара, которое связано с относительной влажностью следующим соотношением:

$$p = RH \times ps(T)/100,$$

где RH — относительная влажность, %; $ps(T)$ — давление насыщенного водяного пара в воздухе при температуре T [9].

Отсюда следует, что определяющим параметром является не относительная влажность, а фактическое давление водяного пара в атмосфере. При температуре +35 °С и относительной влажности 90% давление водяного пара приблизительно равняется 51 Па, при +65 °С — 225 Па, при +85 °С и 85% — 491 Па, а при «обычных условиях окружающей среды» давление водяного пара не превышает примерно 16 Па.

Растворимость/постоянная сорбции — постоянная величина для конкретного влагозащитного покрытия электронного узла, омываемого водой или поглощающего воду. Посторонние включения, такие как ионные загрязнения (например, соли олова или свинца) или полярные смолы из остатков паяльной пасты, могут привести к увеличению этой постоянной и, соответственно, росту абсорбции, который вызовет дальнейшее снижение сопротивления изоляции.

В этом контексте следует отметить, что, подобно константе скорости в уравнении Аррениуса, существуют дополнительные зависимости от преобладающей влажности воздуха или других воздействий окружающей

среды. «Скорость реакции» деградации полимера, имеющей зависимость от температуры в соответствии с уравнением Аррениуса, выражается следующим образом:

$$RGt = A \times \exp(\Delta Ea/kT).$$

На базе модели Аррениуса можно применить формулу Эйринга, то есть подход с математически разделяемыми независимыми переменными, задав один или несколько дополнительных типов воздействия, помимо температуры. В отличие от энергии активации, которая выводится из механистического подхода, функции воздействий (таких как относительная влажность, напряжение, мощность и т. д.) имеют эмпирическую природу с задаваемыми путем подбора коэффициентами пропорциональности:

$$RGt = A(T) \times \exp(\Delta Ea/kT + (B+C/T) \times Sf),$$

где B , C — это параметры, которые определяют деградационные взаимосвязи между различными комбинациями воздействий; Sf — дополнительная функция воздействий (относительная влажность, напряжение, мощность и т. д.). Все прочие параметры можно взять из модели Аррениуса. Формулу Эйринга можно дополнить другими членами (приложение [10]).

Исходя из физико-механистического описания, относительную влажность в подходе Эйринга необходимо заменить парциальным давлением водяного пара, поскольку согласно закону Генри именно оно задает абсорбцию влаги. При использовании такой комбинации воздействий имеет место, например, уменьшение времени исследования (исходя из $Ea = 0,5$ эВ — для типичных коррозионных процессов) в соответствии с уравнением, приведенным в приложении, — ориентировочно с 1000 ч при +40 °С/93% до 200 ч при +85 °С/85%.

Такие математические подходы справедливы, пока воздействия идентичны тем, которые задаются законом Генри (то есть пока мы имеем гетерогенное равновесие между твердым телом и паром). Однако при конденсации данное главное условие уже не выполняется. В этом случае образуется замкнутая водяная пленка, препятствующая обмену влагой между полимером и атмосферой. Изотермы сорбции материалов покрытий обычно имеют сигмовидную форму (рис. 1, 2), то есть абсорбция воды растет с увеличением относительной влажности, а затем резко возрастает при относительной влажности выше 95%.

Удобно, что последствия описываемой сорбции водяного пара можно определить путем косвенного измерения влажности и сопротивления изоляции. С накоплением влаги электрическое сопротивление падает, что позволяет делать выводы о содержании влаги и при этом дает важный параметр покрытия, который можно использовать.

Для практической оценки характеристик электрической изоляции при различных условиях температуры и влажности рекомендуется

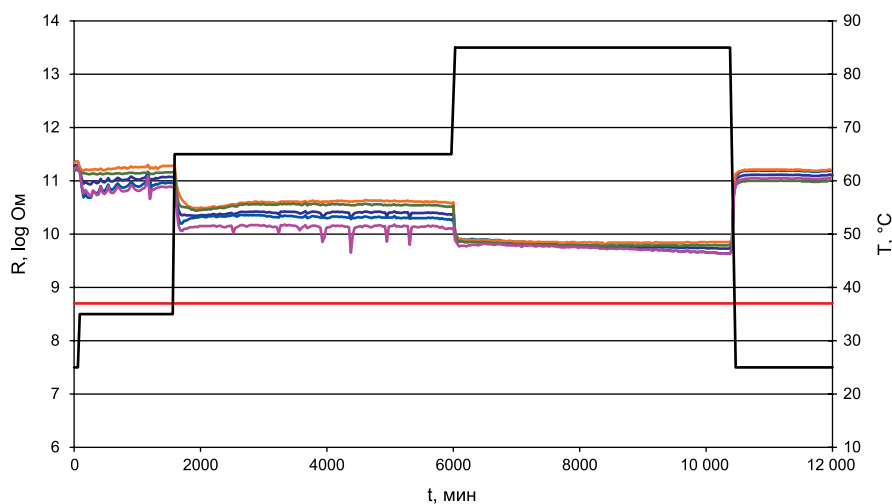


Рис. 1. Цикл «85/85» для оценки влажности и сопротивления изоляции (предельное значение IPC по классу В для «гидролитически устойчивого конформного покрытия» согласно IPC-CC-830В [7] установлено равным 500 МОм)

пользоваться набором параметров, которые установлены при таких условиях температуры и влажности. В рамках процедуры внутреннего квалификационного отбора наши материалы покрытий должны сохранять сопротивление изоляции не менее 500 МОм при максимальной климатической нагрузке (температура +85 °С, относительная влажность 85%).

При оценке данного подхода следует отметить, что он действительно применим для описания влажности и сопротивления изоляции. Он позволяет быстро выявлять основные проблемы, связанные с совместимостью материалов и/или технологическими процессами, а также тенденции к их возникновению. Описываемый цикл испытаний должен быть ориентирован на то, чтобы воздействие влаги на полимер было регенерируемым, то есть конечное состояние после испытания должно быть идентично исходному.

Электрическая изоляция в условиях конденсации

Испытания, проводимые в условиях высокой влажности (например, +85 °С/85%), не обяза-

тельно приводят к отказам. Так, паяльные пасты и флюсы способны выдерживать подобные воздействия. В этом смысле ценность защитного покрытия представляется сомнительной. Но если в тех же обстоятельствах имеет место незначительная конденсация (риске ее, разумеется, возрастает при очень высокой влажности и интенсивных колебаниях температуры), рост дендритов и электрические отказы начинаются всего через несколько минут [11].

Испытания на воздействие конденсационной влаги впервые начали применять в сфере защиты от коррозии. Испытание на конденсацию по стандарту DIN EN ISO 6270-2 (ранее DIN 50017) — это моделирование высокой атмосферной влажности (например, тропического климата) или помещений с высокой степенью конденсации. Нагрузка заключается в воздействии смеси воздуха и водяного пара при относительной влажности 100% и температуре +40 °С. В данном случае испытание выполняется при так называемых условиях постоянной конденсации. В его ходе образец непрерывно подвергается действию конденсационной влаги. Это тестирование предполагает высокую осмотическую нагрузку

на материал покрытия и поверхность печатной платы и очень чувствительно к ионным загрязнениям. На коротких отрезках времени такое испытание описывает поведение в условиях высокой влажности с конденсацией, а при долговременном воздействии (более 30 дней) оно начинает перекрываться с испытанием на стойкость к гидролизу.

В отличие от чистого испытания на стойкость к гидролизу, это испытание позволяет измерить электрические характеристики (сопротивление изоляции при воздействии влажности в условиях конденсации), приложив к объекту испытаний напряжение. Типичные графики результатов такого испытания, в данном случае ограниченные по времени воздействия 72 ч, приведены на рис. 3. Здесь снижение сопротивления изоляции коррелирует с поглощением влаги полимером под воздействием конденсации. Состав наших конформных покрытий таков, что они удовлетворяют требованиям стандарта IPC даже в условиях конденсации при температуре +40 °С. По окончании испытания измеряется способность системы к регенерации [14].

На рис. 3 показан пример электронного узла, на котором четко видна сконденсировавшаяся влага. На гибкую печатную плату со смонтированными на ней светодиодами было нанесено конформное (влагозащитное) покрытие ELPEGUARD. Далее эта плата проработала без сбоев в течение 42 дней в условиях конденсации (+40 °С/100%), после чего испытание было прервано. Эффектов переноса, коррозии или иной деградации выявлено не было (рис. 4).

В условиях конденсации следует уделить особое внимание взаимодействию между конформным покрытием и, например, остатками паяльной пасты. В процессе нанесения покрытия на электронный узел присутствующие на печатной плате частицы загрязнений становятся частью конформного покрытия. В зависимости от загрязнения такое включение может резко снизить уровень защиты влагостойкого покрытия. Здесь воздействие конденсационной влаги сказывается гораздо ошутимее, чем, скажем, высокая влажность

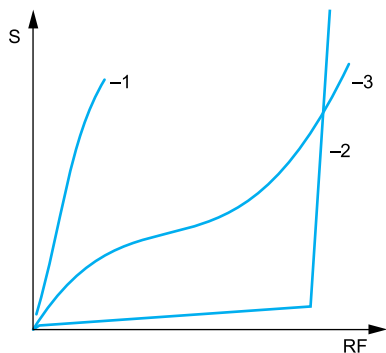


Рис. 2. Изотерма сорбции S описывает связь между содержанием воды в веществе и относительной влажностью RH окружающего воздуха при постоянной температуре:
1 — высокогигроскопичные вещества; 2 — соли;
3 — полимеры с низким поглощением воды



Рис. 3. Пример электронного узла в условиях конденсации при 40 °С/100% (источник: Lackwerke Peters GmbH + Co KG)

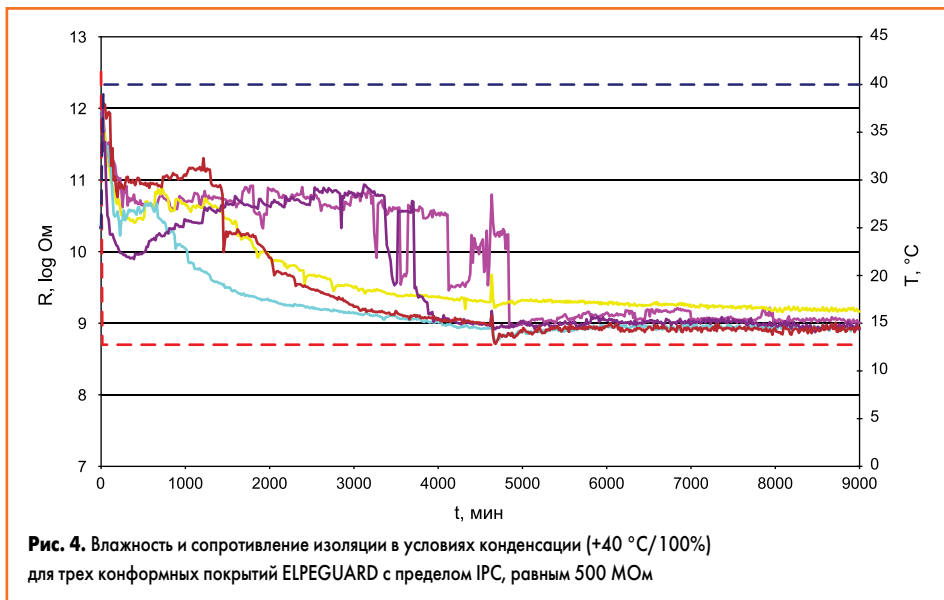


Рис. 4. Влажность и сопротивление изоляции в условиях конденсации (+40 °C/100%) для трех конформных покрытий ELPEGUARD с пределом IPC, равным 500 МОм

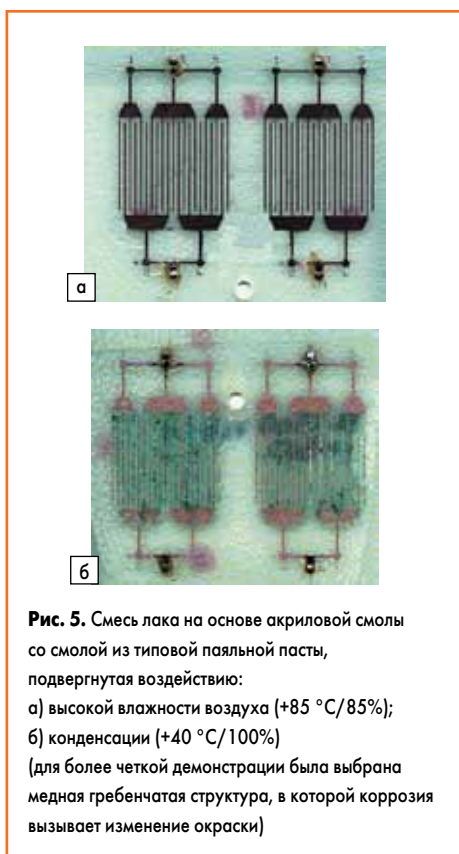


Рис. 5. Смесь лака на основе акриловой смолы со смолой из типовой паяльной пасты, подвергнутая воздействию:
 а) высокой влажности воздуха (+85 °C/85%);
 б) конденсации (+40 °C/100%)
 (для более четкой демонстрации была выбрана медная гребенчатая структура, в которой коррозия вызывает изменение окраски)

воздуха. Испытательные гребенчатые структуры, имеющие достаточно высокое сопротивление изоляции (выше 500 МОм при температуре +85 °C и относительной влажности 85%), в условиях конденсации могут в течение всего нескольких часов или дней [14] продемонстрировать снижение сопротивления всего до нескольких кОм и коррозионные отказы, обусловленные эффектами переноса.

На рис. 5 показаны примеры воздействия влаги на смесь лака на основе акриловой смолы со смолой из типовой паяльной пасты при намеренно выбранном неблагоприятном соотношении содержания смол (50:50). В смеси отсутствовали остатки флюса, соли олова и свинца после процесса пайки. Здесь можно видеть четкую разницу между физическим воздействием (подача напряжения на гребенку для измерения

сопротивления поверхностной изоляции) и результатом такого воздействия в условиях высокой влажности воздуха (+85 °C/85%) и конденсации (+40 °C/100%).

Хотя данная смесь устойчива к электромиграции при высокой атмосферной влажности, в условиях конденсации наблюдается интенсивная электрохимическая коррозия. Процессы, происходящие при воздействиях этих двух типов, сравнивать нельзя!

Выводы

Воздействие конденсационной влаги следует рассматривать как особо критическое воздействие. С одной стороны, конденсация вызывает отказ электронных узлов без защитного покрытия за очень короткое время, а с другой — выявляет слабые места покрытия, связанные с наличием технологически обусловленных посторонних включений в защитной пленке.

Соответственно, в ходе квалификационных испытаний электронных узлов их действительно необходимо подвергать воздействию высокой влажности при более или менее высоких температурах, хотя такого рода испытания недостаточно показательны, поскольку не учитывают последствия неизбежных на практике процессов конденсации.

Результаты исследования воздействия температурных и влажностных нагрузок на конформные покрытия показывают, что при рассматриваемых воздействиях сохраняется функциональная надежность объектов испытаний. Выводы о функциональной надежности делались на основании подробного анализа электрических параметров испытанных печатных узлов. Результаты измерения сопротивления изоляции в условиях воздействия влаги подтверждают, что даже при жестких атмосферных воздействиях (температура +85 °C, относительная влажность 85%), а также при конденсации сохраняются достаточно высокие значения данного параметра. Это показывает, что защитное покрытие электронного узла может надежно обеспечивать безопасность даже при высокой температуре и влажности при условии использования надлежащих материалов.

Адаптированная формула Эйринга по Лоусону, которая часто используется для исследования температурно-влажностных воздействий:

$$AFT/RH = AFT \times AFRH = \exp[-EA/k(1/T_0 - 1/T_1) - B(RH_{02} - RH_{12})],$$

где AFT/RH — комбинированный коэффициент ускорения (T — температура; RH — относительная влажность); AF — коэффициент ускорения; EA — энергия активации реакции (например, для коррозионных процессов — 0,4–0,6 эВ); k — постоянная Больцмана ($k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К, или $8,617 \times 10^{-5}$ эВ/К); T_0 — температура эксплуатации, К; T_1 — температура при испытаниях, К; RH_{02} — относительная влажность в процессе эксплуатации; RH_{12} — относительная влажность в условиях испытаний; B — экспериментальная постоянная (например, $5,57 \times 10^{-4}$).

Литература

1. Lemaire J., Arnand R., and Gardette J.-L. Low temperature thermo-oxidation of thermoplastics in the solid state. *Polymer Degradation and Stability* 33:277–94, 1991.
2. Kamal M.R., Saxon R. Recent developments in the analysis and prediction of the weatherability of plastics. *Applied Polymer Symposia* 4:1-2, 19678.
3. Scherl R. Klimatische Anforderungen und Prüfungen im Automobilbereich für Elektronik. VDE-Seminar, Frankfurt, 2007.
4. Freund J., Halbritter J., Körber J. K. H. How dry are Dried Samples? Water Adsorption Measured by STM; *Microscopy Research and Technique* 44, 327–338 (1999).
5. Luck W. A. P. Structure of Water and Aqueous Solutions, Verlag Chemie 1973.
6. IPC-HDBK-830 Guidelines for Design, Selection, & Application of Conformal Coatings, 2002.
7. IPC-CC-830B Qualification and Performance of Electrical Insulating Compound for Printed Board Assemblies, Ausgabe 2002.
8. Licari J. C., Hughes L. A. Coating Materials For Electronic Applications. Noyes Publications, Park Ridge NJ, 1990.
9. Funke W. Permeability Processes in painting films, *Proceedings of Surface* 66, 1966.
10. NIST, Engineering Statistics Handbook — Assessing Product Reliability, Statistical Engineering Division, National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD, 2007.
11. Vermeidung von Elektronik-Fehlern durch Feuchtigkeit, Auto-Jahresbericht 2004, VDA.
12. Pinfos L. Water absorption and water vapour permeability. Corporate Magazine of the Peters Group, Edition 25 of May 2004.
13. Tegehall P.-E. Impact of Contamination from Production Processes on the Reliability of Printed Board Assemblies. Proc. Int. Conf. on Electronic Assembly: Materials and Process Challenges, pp. 69–80, 1998.
14. Pinfos L. Electrical insulation under moisture stress. Corporate Magazine of the Peters Group, Edition 29 May 2006.