

# Защитные покрытия для электронных модулей при нагрузке высокой влажностью и оттаивании

**Тема факторов нагрузки и происходящих из-за них отказов становится все более важной, особенно в автомобильной промышленности, не в последнюю очередь из-за того, что все больше электронных модулей встраивается в автомобили. Эти электронные модули постоянно подвергаются вредному воздействию окружающей среды. Помимо исключительно температурной нагрузки, электронные узлы также подвергаются различным нагрузкам влажностью. В данной статье продемонстрированы различные испытания влажностью на примере тестовых образцов, а также показано их отличие от испытаний на воздействие инея с его последующим оттаиванием. При оттаивании могут также происходить осмотические и различные химически-физические процессы, которые не возникали бы только при высокой нагрузке исключительно влажностью. В таком случае наряду с чисто физическими процессами могут проходить и химически необратимые процессы деградации.**

**Манфред Зуппа  
(Manfred Suppa),  
к. т. н.**

manfred.suppa@peters.de

**Перевод: Андрей Новиков**

andrej.novikov@uni-rostock.de

## Введение

Влажность (вода) в материалах, например, в полимерах или металлах, вызывает обратимые и/или необратимые изменения. Если увеличивается температура материалов, содержащих влагу, заметно повышается и влагопоглощение, вследствие чего ускоряются процессы передачи и происходит усиление электрической проводимости в соответствии с уравнением Аррениуса. Влияние влаги, точнее нагрузки влажностью, мы рассмотрим более подробно.

Атмосферная влажность часто приравнивается к относительной влажности. С химической и физической точки зрения, напротив, абсолютная влажность является часто более значимой величиной. Она определяется следующим образом:

- Абсолютная влажность — это общая масса водяного пара в граммах в одном кубометре воздуха. Это означает, что при нагреве влажного воздуха относительная влажность частично заметно понижается, при этом абсолютная влажность в грамме воды на кубометр остается неизменной. Многие физические процессы регулируются с помощью этой абсолютной влажности, которая обозначается как парциальное давление водяного пара.
- Относительная влажность (ОВ) — это насыщение воздуха при заданной температуре, указывается она в процентах ОВ (отношение существующего на данный момент в воздухе давления водяного пара к давлению насыщенного пара над водой).

При относительной влажности воздуха в 50% воздух содержит лишь половину количества водяного пара, которое он может максимально поглотить при соответствующей температуре. При 100% от-

носительной влажности воздух полностью насыщен водяным паром. Если коэффициент насыщения превышает 100%, то излишняя влажность оседает в виде конденсата или тумана. При достижении точки росы воздух насыщен водяным паром и начинается конденсация (100% ОВ). Точка росы — это значение температуры влажного воздуха, при котором он насыщен водяным паром и конденсирует влагу при дальнейшем понижении температуры. В этом состоянии относительная влажность воздуха составляет 100%. Часто точка росы описывается как разница температур между температурой в данный момент и температурой точки росы.

При атмосферной нагрузке в обычных климатических условиях также всегда присутствует нагрузка влажностью. Покрытие электронного модуля находится в состоянии равновесия с водяным паром (парциальным давлением водяного пара) атмосферы. Так как все полимеры паропроницаемы, в полимере всегда содержится определенная доля воды. Эта вода растворяется или же накапливается в полимере. При повышении температуры и/или увеличении влажности воздуха в полимере может накапливаться больше воды. В таких случаях равновесие из воды, растворимой в полимере, и давления водяного пара в воздухе является решающей движущей силой. При оттаивании это соотношение ведет себя иначе.

Физическое влияние влажности воздуха на полимеры и, таким образом, на электрические модули будет разделено на адсорбирующую влажность (воду) и абсорбирующую влажность (воду). Адсорбция воды представляет собой отложение воды на поверхности металла или полимерного материала, что может, например, привести к понижению поверхностного

0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Низкая влажность			Средняя влажность			Высокая влажность			Макс. влажность	
Риск электростатического разряда			Эксплуатация без проблем			Критическая эксплуатация			Особый случай	

**Рис. 1.** Влияние относительной влажности от 0 до 100% на эксплуатацию электронных модулей

сопротивления. Изоляция внутри материала не подвергается воздействию, на нее оказывает воздействие абсорбция (воды). Абсорбция представляет собой физическое проникновение одного материала в другой.

При практических нагрузках влажностью, как, например, на электронных модулях, оба явления происходят параллельно. При очень сухой атмосфере ниже 50% ОВ образуется так называемая водяная пленка толщиной около 10 нм — чаще всего в форме капель или островков. Пленка такой толщины может уже вступать во взаимодействие с гидроскопическими загрязнениями на ее поверхности. Начиная приблизительно с 50% ОВ, толщина водяной пленки резко увеличивается и может достигать 60 нм.

Большинство электронных модулей эксплуатируются при этих условиях, и, как правило, дополнительное защитное покрытие для них не требуется. При влажности воздуха более 70–80% ОВ, напротив, все время присутствует скрытая угроза образования инея и его последующего оттаивания (рис. 1). Точка росы находится уже при 2...3 °С. Если же происходит оттаивание, имеет место особый случай, так как поведение электронного модуля уже нельзя описать при помощи исследований при высокой влажности воздуха.

### Электрическая изоляция при нагрузке влажностью

Описанные процессы адсорбции, которые могут вести к ослаблению действия изоляции между двумя потенциалами в электронном модуле, могут быть исключены при помощи нанесения защитного слоя. Адсорбция будет принципиально проходить, но уже на защитном покрытии, без повреждения изоляции потенциалов. То же относится и к оттаиванию. Значительное влияние на электрические изоляционные характеристики оказывает температура и влагосодержание атмосферы.

Покрытия для защиты от коррозии всегда подвержены более или менее регулярной нагрузке влажностью. В таком случае материалы покрытия имеют различное влагопоглощение, которое может оказывать влияние на:

- механические свойства;
- адгезионную прочность;
- температуру стеклования;
- свето- и погодостойкость;
- антикоррозионные свойства;
- электрические изоляционные свойства.

Влажность и вода оказывают наиболее вредное влияние на материалы покрытия. Далее будет особенно внимательно рассмотрено сопротивление изоляции в зависимости от нагрузки влажностью.

Молекулы или атомы газов и жидкостей перемещаются и смешиваются в связи с их тепловым движением. В статически неподвижной жидкости каждая молекула передвигается в среднем приблизительно на 1 см в день. Путь в 1 см соответствует 10 переменам мест в секунду. Этот феномен известен также как броуновское движение. В полимерах эти процессы перемещения мест протекают со скоростью в 100 раз ниже. При грубых подсчетах толщину полимерной пленки в 50 мкм молекулы проходят меньше чем за 10 минут.

Паропроницаемость полимеров сама по себе не является неперенным критерием отказа от использования их в качестве материалов изоляции. Все полимеры в определенной степени паропроницаемы, обозначается эта паропроницаемость как проникающая способность. Эту паропроницаемость нельзя путать с проникновением жидкости сквозь полимерную пленку, которое происходит через мельчайшие поры. Поры являются дефектами покрытия, и их появление нельзя допускать.

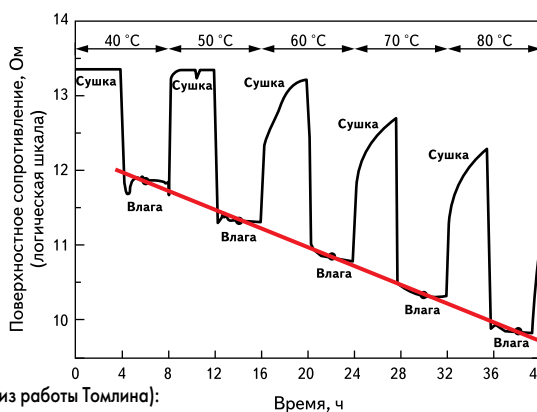
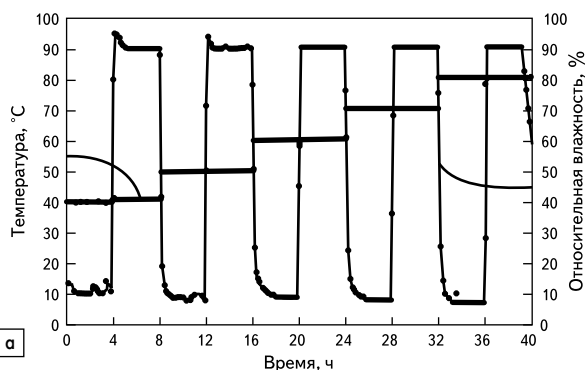
Правда, условием является то, что диффузионная влага не может сама накапливаться ни на пограничной поверхности «полимер – субстрат», ни в самом полимере. Отсюда следуют важные для анализа субстрата выводы.

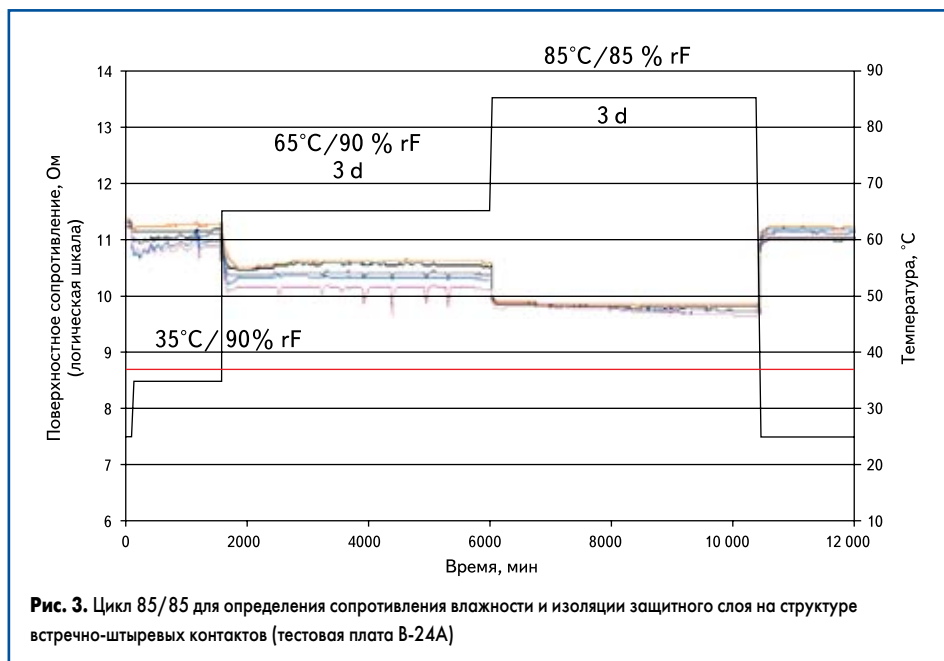
Загрязнения электрически проводимых компонентов, например, солями (пот рук), вполне могут приводить к ослаблению граничной поверхности из-за образования островков влаги.

По-другому ведут себя полимеры при накоплении в них воды. Количество поглощенной воды зависит как от числа полярных групп в структуре полимера, так и от его плотности. Испытания диффузии показывают, что подвижность зависит и от температуры, и от уже растворенного в полимере количества воды. Если полимер содержит мало воды (немного полярных групп), немного молекул воды передвигаются с небольшим взаимодействием в матрице относительно свободно. Коэффициент диффузии имеет достаточно большое значение. При увеличении количества воды (много полярных групп) молекулы воды собираются в кластеры. Взаимодействия увеличиваются, а подвижность и коэффициент диффузии уменьшаются. Если простое накопление молекул воды, изолированных друг от друга, скорее неважно, образование кластеров или наполненных водой пограничных поверхностей очень критично. В этих кластерах легко перемещаются электрические заряды, что приводит к сильному падению сопротивления изоляции.

Знания об общем проникновении молекул воды сквозь полимерную пленку заставляют обратить внимание на субстрат, основание, на которое наносится покрытие. Загрязнения, содержащиеся уже здесь, не могут быть изолированы и полностью обезврежены. Водорастворимые элементы образуют потенциально слабое место. Утверждение об эффективном защитном действии покрытия может быть сделано лишь в связи с как можно более приближенным к процессу изготовления электронным модулем.

Сопротивление влаги и изоляции передается при помощи процессов перемещения, точнее, диффузионных процессов, которые обусловлены электрическим полем. Все процессы перемещения в твердых телах и жидкостях показывают температурную зависимость, которая часто может быть вычислена при помощи уравнения Аррениуса. Испытания, проведенные в Национальной физической лаборатории (National Physical Laboratory, NPL) в Теддингтоне, Великобритания, показывают изображенную на рис. 2 температурную за-


**Рис. 2.** Зависимость сопротивления влаги и изоляции защитного покрытия от температуры (из работы Томлина): а) профиль температуры – влажность; б) измерение сопротивления влаги и изоляции



висимость сопротивления влаги и изоляции покрытия (Surface Insulation Resistance, SIR) на типичных встречно-штыревых контактах для измерения. На рис. 2а изображен лежащий в основе профиль температуры – влажности.

В этом испытании использовался цикл влажности от 10 до 90% ОВ с двухчасовой задержкой и температурным ступенчатым профилем от 40 до 80 °С. Четко виден спад сопротивления изоляции с изменением температуры. Это линейное падение сопротивления изоляции может быть вполне использовано для технической интерпретации, так как испытание демонстрирует реально возможные факторы нагрузки.

Интересны здесь и различные переходные процессы на разных этапах цикла. Так, паровая фаза быстро установилась на соответствующей измеренной величине, в то время как фаза высыхания оказывает влияние на сопротивление влажности и изоляции гораздо медленнее, и при высоких температурах даже после двух часов не было зафиксировано постоянной величины.

Более конкретная интерпретация механизма воздействия, или анализ по Аррениусу, здесь проблематична. Помимо изменяющейся температуры, был изменен и второй основной физический параметр — реально содержащаяся на и в полимере влажность атмосферы. При постоянной относительной влажности воздуха и различных температурах преобладают абсолютно разные величины парциального давления водяного пара. Так как парциальное давление пара влияет на процессы адсорбции и абсорбции, действительно присутствует увеличивающаяся нагрузка из-за влажности воздуха.

Испытания приводят к выводу, что, хотя знание величины сопротивления влажности и изоляции является необходимым, одного его недостаточно, и соответствующие измерения при различных температурах и нагрузках влажностью также имеют большое значение.

Для описания процесса изоляции защитного покрытия при различных климатических

параметрах в климатическом шкафу проводится цикл, который содержит разные комбинации параметров влажности и температуры, согласно описанию в тех или иных нормах. Климатические условия начинаются с 25 °С и 50% ОВ (показатели комнатной температуры), продолжают при 35 °С и 90% ОВ, 65 °С и 90% ОВ и заканчиваются на 85 °С и 85% ОВ при измерениях после 1 часа (1 ч), от одного дня (1 д.) до 3 дней (3 д.). После окончания цикла определяются свойства регенерации при показателях комнатной температуры. Это испытание подходит, например, для тестирования защитных покрытий и/или процессов их изготовления. На рис. 3 изображен характерный ход кривой для сопротивления влажности и изоляции защитного покрытия при различных климатических параметрах.

При интерпретации данного изображения необходимо учитывать, что здесь речь идет о характерном отображении сопротивления влажности и изоляции материала покрытия. Это изображение показывает массопередачу влажности (воды) из паровой фазы (атмосферы) в и сквозь пленку покрытия при разных климатических условиях. Отсюда следует, что движущей силой является не относительная влажность, а фактическое давление водяного пара в атмосфере. При 35 °С и 90% ОВ давление водяного пара составляет около 51 Па, при 65 °С — 225 Па, а при 85 °С и 85% ОВ (тест 85/85) — около 491 Па. При комнатных условиях давление водяного пара, напротив, составляет лишь около 16 Па.

Это испытание не должно заменять испытания на длительное хранение, которые также учитывают возможные медленные процессы деградации. Тем не менее, можно сделать вывод, что имеет место постоянное падение сопротивления влажности и изоляции после 3 дней при условиях 85 °С/85% и сохранение стабильного сопротивления после 7 дней при 65 °С и 90% ОВ. Особенно быстро можно зарегистрировать тенденции развития основных проблем совместимости и/или различных процессов.

В связи с чем указывается на то, что аналогично с фактором ускорения из соотношения Аррениуса имеется такая зависимость от преобладающей влажности воздуха или от других параметров нагрузки. Скорость реакции зависима от температуры механизма деградации по Аррениусу определяется следующим образом:

$$RG_t = A \exp(\Delta E_a/kT). \quad (1)$$

Основываясь на модели Аррениуса и соотношении Эйринга математически разделяемых независимых переменных, можно вывести следующее уравнение, которое включает в себя дополнительно к температуре один или несколько видов нагрузки. В отличие от выводимой согласно механизмам воздействия величины энергии активации, расширенные функции нагрузки имеют эмпирический характер с приспособляемыми величинами пропорциональности:

$$RG_t = A(T) \exp(\Delta E_a/kT + (B+C/T) \times S_f), \quad (2)$$

где  $B, C$  — параметры, которые определяют отношения деградации между различными комбинациями нагрузки;  $S_f$  — дополнительная функция видов нагрузки, таких как относительная влажность, напряжение, ток или тому подобное. Остальные параметры можно взять из модели Аррениуса. Соотношение Эйринга может быть дополнено другими членами и в итоге приведено к соотношению Лавсона, которое зачастую используется для анализа нагрузки температурой и влажностью и особенно часто применяется в области автомобильной электроники:

$$AF_{T/RF} = AF_T \times AF_{RF} = \exp[-E_A/k(1/T_0 - 1/T_1) + B(RF_0^2 - RF_1^2)], \quad (3)$$

где  $A$  — постоянная пропорциональности, в модели Эйринга зависящая от температуры  $A(T)$ ;  $AF$  — фактор ускорения,  $T$  — температура;  $RF$  — относительная влажность;  $E_A$  — энергия активации для реакции (для процессов коррозии, например, 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 на выходе (температура эксплуатации);  $T_1$  — температура тестирования;  $B$  — коэффициент пропорциональности (для уравнения Лавсона:  $B = 5,57 \times 10^{-4}$ );  $RF_0$  — относительная влажность на выходе ( $RF$  в эксплуатационной нагрузке);  $RF_1$  — относительная влажность во время тестирования. Здесь  $T_0$  может, например, обозначать эксплуатационную нагрузку, а  $T_1$  — температуру тестирования.

При применении этих комбинированных нагрузок в соответствии с уравнением (3) получается, например, сжатие оси времени 1000 часов при 40 °С и 93% ОВ, 200 часов при 85 °С и 85% ОВ (при энергии активации  $E_A$ , равной 0,5 эВ, что соответствует типичному механизму коррозии).

Эти математические решения имеют силу, как было описано вначале, до тех пор, пока нагрузка соответствует закону Генри, то есть сохраняется гетерогенное равновесие «твердое тело: водяной пар». Это условие теряет свою силу,

если происходит оттаивание. В таком случае образуется сплошная водяная пленка, и обмен полимером с влажностью воздуха прерывается.

### Электрическая изоляция при оттаивании

Испытания при климатических условиях с высокой нагрузкой влажностью, например, при 85 °C и 85% ОВ, не ведут автоматически к сбоям, вызванным оттаиванием. У встречноштыревых контактов без защитного покрытия при тестировании паяльных паст и/или флюсов обнаруживаются при этих нагрузках вполне высокие показатели электрической изоляции. Одно это испытание поставило бы важность защитного покрытия под сомнение, так как даже небольшая конденсация при достижении температуры ниже точки росы ведет к росту дендритов и электрическому сбою в течение всего нескольких минут. Влияния температурных колебаний и колебаний влажности могут быть определены лишь при помощи так называемого испытания циклическим воздействием агрессивных сред.

Возможные влияния оттаивания на электронику в автомобилях были описаны в отчете 2004 года немецкого Объединения автомобильной промышленности. Приведем фрагмент из него:

«Электронные узлы в транспортном средстве подвергаются сильным изменениям условий окружающей среды. Колебания температуры настолько велики, что часто достигается температура ниже точки росы на печатных платах электронных модулей в автомобиле. Из-за оттаивания на печатных платах возникает влажность, вследствие чего из-за нарастающего повышения электрических сопротивлений и постоянного уменьшения расстояний между печатными проводниками могут возникать как отдельные сбои из-за тока утечки в воде после оттаивания, так и необратимые повреждения из-за электрохимической миграции».

Для того чтобы избежать возникновения подобных проблем, печатные платы уже частично обработаны защитным лаком или полностью им залиты. Однако системы сенсоров и оптика не могут быть покрыты защитным лаком. В связи с чем изготовители транспортных средств разработали пилотное испытание,

которое позволило систематически контролировать процессы оттаивания в лаборатории. При помощи этого испытания стало возможным исследовать печатные платы без защитного покрытия на предмет отказа их функций. Таким образом, можно было целенаправленно обрабатывать лаком те печатные платы, в которых это было необходимо. Из-за отсутствия подходящего метода измерений приходилось определять параметры для испытания эмпирическим путем.

Но на данный момент многие вопросы так до конца и не решены. Поэтому в рабочем подразделении условий окружающей среды Комитета технических норм и стандартов автомобильной промышленности Германии (FAKRA) была основана рабочая группа по исследованию воздействия оттаивания, цель которой — разработать близкое к реальности испытание. Результаты работы этой группы будут отражены в нормах ISO 16750 — моделирование окружающей среды.

Под переменной климата нужно понимать не только перемену дня и ночи, климатические изменения времен года или кратковременное повышение влажности воздуха после грозы, но и изменения в так называемом микроклимате. В автомобилях это, например:

- колебания климата в зависимости от времени года и времени дня;
- изменения климата в ходе эксплуатации;
- попадание дополнительной влаги в салон автомобиля.

Помимо возможных температурных эффектов, при изменении климата может также достигаться температура ниже точки росы, что приводит к конденсации влаги. Ускоренные климатические испытания, такие как THB (Temperature Humidity Bias) (85 °C и 85% ОВ) или HAST (Highly Accelerated Temperature/Humidity Stress Test), применяются для исследования чувствительности электронного модуля к влажности. Однако при этих условиях испытания не происходит оттаивание. Только испытания с целенаправленным оттаиванием дают информацию о рабочей надежности электронного модуля при образовании инея и последующем оттаивании в ходе дальнейшей эксплуатации.

Отображения оттаивания обычно можно добиться при помощи специального регулирования климатического шкафа, так называемого линей-

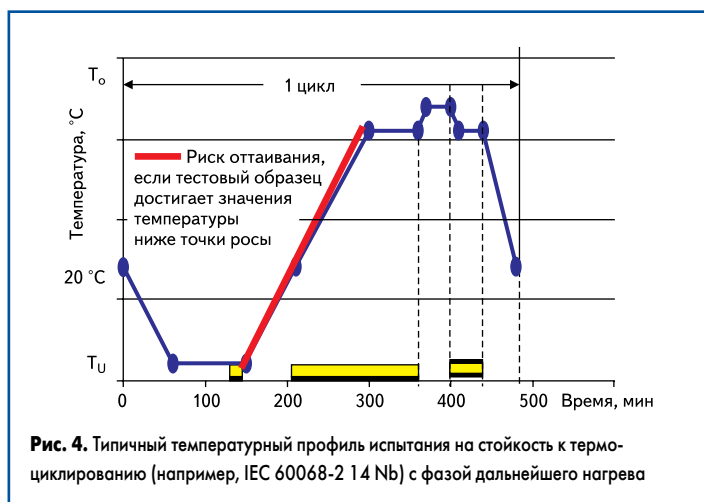
ного нагрева испытательной камеры воздухом, подводимым над емкостью с водой, или путем перемещения охлажденного электронного модуля во влажное тепло в соответствии со стандартами JASO (Japanese Automotive Standards Organisation). Опасность оттаивания или же его отображения, таким образом, непосредственно связана с изменением климата (температуры). Типичными климатическими испытаниями, представленными на рис. 4, являются:

- IEC 60068-2-30 Db (влажное тепло (25/55 °C/95% ОВ), циклически, без замораживания);
- IEC 60068-2-14 Nb (изменение температуры при нормальной влажности);
- IEC 60068-2-38 Z/AD (влажное тепло (-15/65 °C/93% ОВ), циклически, с замораживанием);
- IPC-TM-650 (руководство по методам тестирования, пункт 2.6.3.4 — сопротивление влажности и изоляции: конформные покрытия).

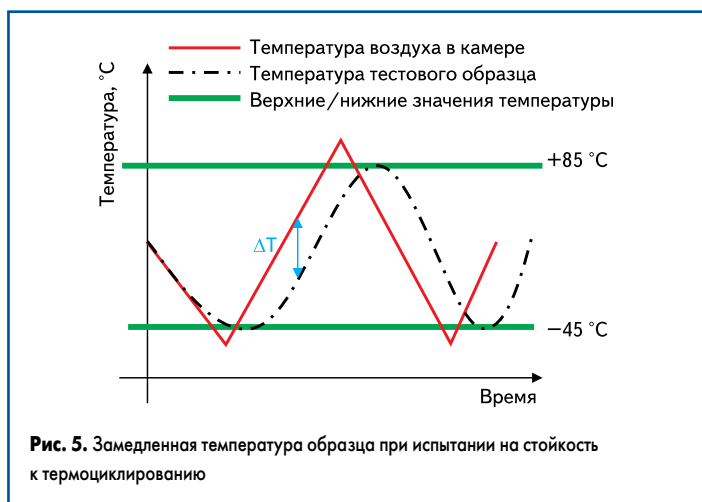
Необходимо, правда, учитывать, что климатические шкафы, как правило, оборудованы таким образом, что по возможности исключается процесс оттаивания образца. Обычное нагревание теплым воздухом не гарантирует оттаивания, климатический шкаф должен иметь функцию оттаивания.

При так называемом BMW-испытании, в соответствии со стандартом BMW Group, климатическая камера нагревается лишь при помощи емкости с водой, а обычно функционирующий нагрев испытательной камеры деактивируется, при помощи чего, с одной стороны, можно достичь очень высокой влажности воздуха — до 100%, а с другой — образец для испытаний нагревается при помощи влажного теплого воздуха. Если собственная температура тестового образца ниже точки росы, то неизбежно происходит оттаивание. Это оттаивание приводит только тогда к коррозионным процессам и образованию дендритов, когда между контактами есть электрический потенциал. Таким образом, стандарт BMW Group требует такое эксплуатационное испытание, которое ограничено по времени, чтобы самонагрев не оказывал влияния на фазу оттаивания.

Из-за замедленной температуры тестового образца, вызванной его термической массой (рис. 5), необходимо учитывать оттаива-



**Рис. 4.** Типичный температурный профиль испытания на стойкость к термоциклированию (например, IEC 60068-2-14 Nb) с фазой дальнейшего нагрева



**Рис. 5.** Замедленная температура образца при испытании на стойкость к термоциклированию



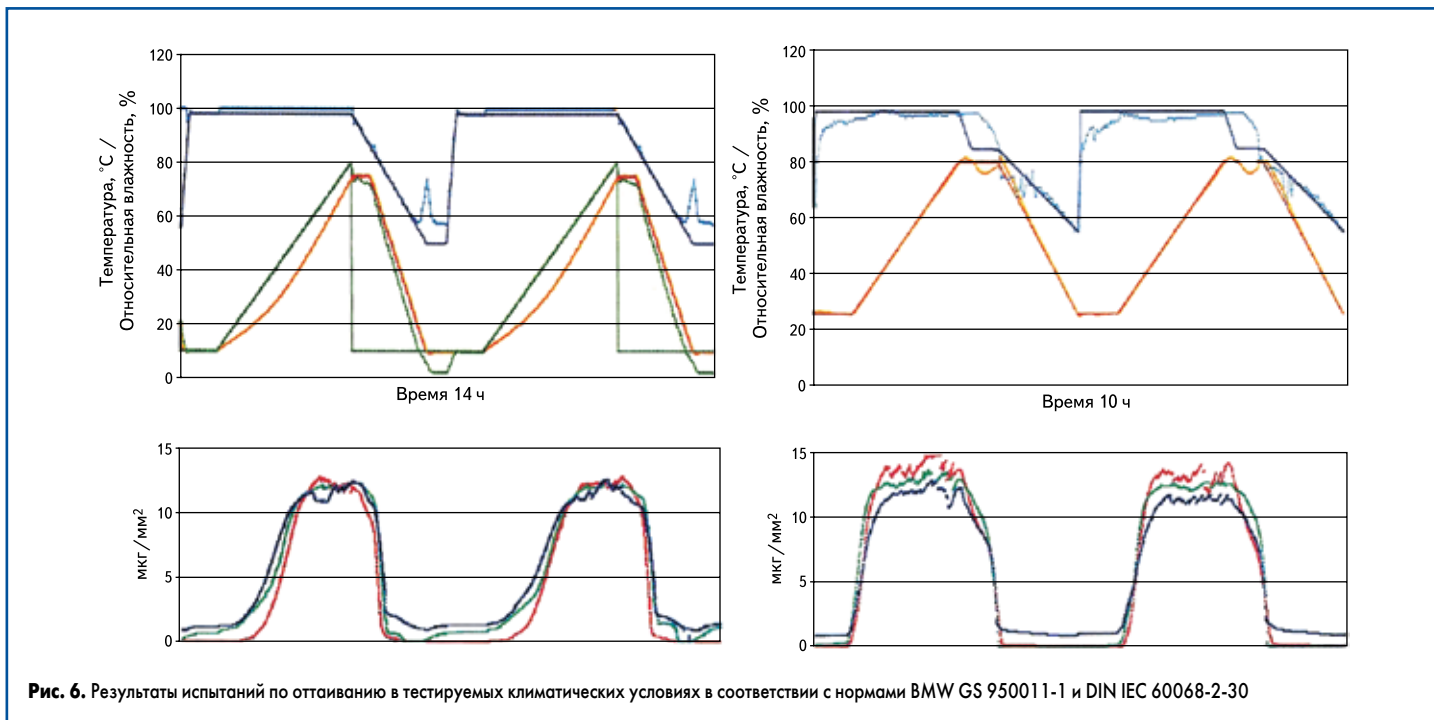


Рис. 6. Результаты испытаний по оттаиванию в тестируемых климатических условиях в соответствии с нормами BMW GS 950011-1 и DIN IEC 60068-2-30

ние также в фазе нагрева. Оттаивание может происходить при повышении температуры. Интенсивность и продолжительность оттаивания зависят и от задержки температуры испытательного образца.

Замедление нагрева  $\Delta T$  на рис. 5 зависит от установленного температурного градиента, а также от так называемой термической массы испытываемого образца. Если температура  $\Delta T$  выше точки росы, то происходит оттаивание поверхности.

В связи с проблемами оттаивания еще раз подчеркивается, что загрязнения (гидроскопические отложения) на поверхности понижают точку росы из-за своей относительно критической влажности, что не может быть зафиксировано сенсорами точки росы. В таком случае оттаивание может происходить, когда достигается относительно критическая влажность загрязнений. Правда, и в этом случае масштаб оттаивания зависит от массы.

Испытание качества защитных лаков в соответствии с нормами IPC-CC-830, IPC-TM-650 проходит параллельно с испытанием на стойкость к термоциклированию. Но оттаивание испытываемых встречно-штыревых контактов практически не происходит, так как климатический шкаф эксплуатируется в обычном режиме, который в значительной мере предотвращает оттаивание.

Испытания, которые проводились в рамках рабочей группы «Оттаивание» Комитета технических норм и стандартов автомобильной промышленности Германии, показывают, что в климатической камере при условиях, соответствующих нормам BMW GS 950011-1 и DIN IEC 60068-2-30, во время цикла в обоих случаях на поверхности сенсора конденсируется влага.

На рис. 6 нижние кривые отображают измерения сопротивления на встречно-штыревых сенсорах без покрытия, которые были сделаны при циклическом испытании нагрузкой температуры и влаги рабочей группой Комитета

технических норм и стандартов автомобильной промышленности. На двух верхних кривых изображены соответствующие условия температуры и влажности. Четко видны откалиброванные в  $\text{мкг}/\text{мм}^2$  сигналы сенсора, которые показывают быстрое оттаивание, а также его высыхание.

Типичные значения сопротивления влажности и изоляции покрытия защитным лаком, измеряемые с помощью встречно-штыревых контактов во время испытания на стойкость к термоциклированию при высокой влажности воздуха (стандарт BMW Group GS 95011-5:2001-08), четко показывают (рис. 7 и 9) циклическую фазу нагрузки, вызванную влажностью. Не только фаза влажности, но и в особенности фаза высыхания демонстрируют быстрый переходный процесс или быструю регенерацию. На рис. 7

наряду с измерениями сопротивлений влажности и изоляции встречно-штыревых контактов с покрытием (голубые кривые) изображены также измерения испытываемых встречно-штыревых контактов без покрытия (оранжевые/коричневые кривые) с различными промежутками между контактами в циклическом испытании нагрузкой температурой и влажностью. Видны четкие падения сопротивления изоляции встречно-штыревых контактов без покрытия, причем испытания проводились с ограничением тока. Также четко видно при всех используемых формах контактов более или менее массовое образование дендритов.

Необходимо заметить, что даже при «непрерывно» измеряющих системах, которые были использованы в данном случае, время между измерениями все же может доходить

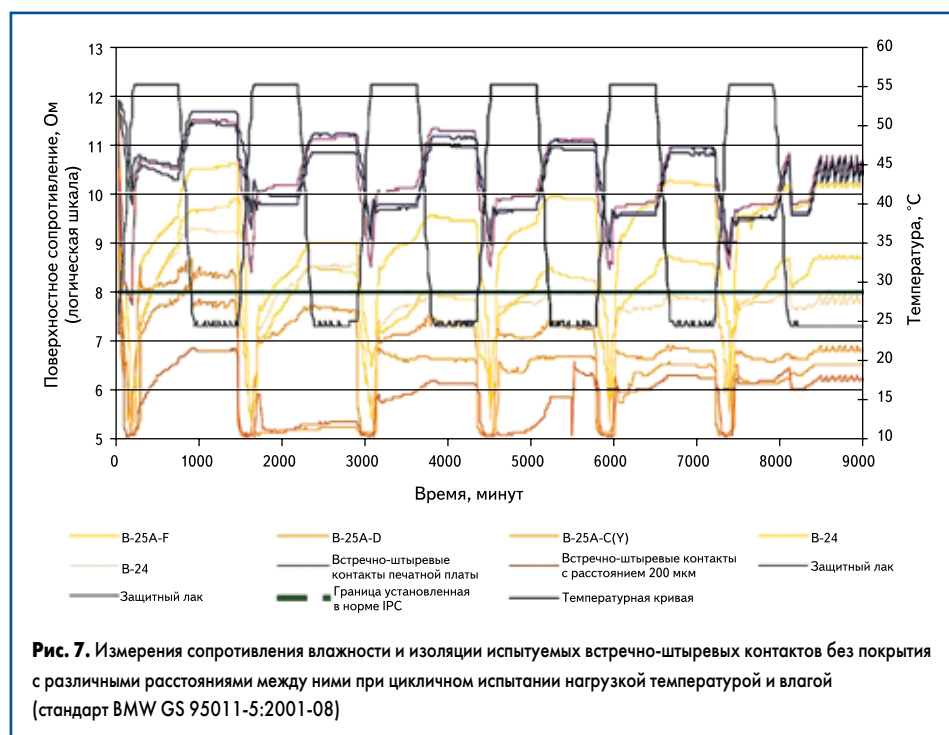
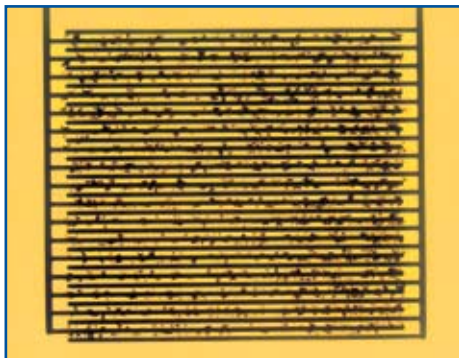


Рис. 7. Измерения сопротивления влажности и изоляции испытываемых встречно-штыревых контактов без покрытия с различными расстояниями между ними при циклическом испытании нагрузкой температурой и влажностью (стандарт BMW GS 95011-5:2001-08)



**Рис. 8.** Образование дендритов на встречно-штыревых контактах без покрытия (расстояние между контактами — 200 мкм) при циклическом испытании нагрузкой температурой и влажностью (стандарт BMW GS 95011-5:2001-08)

до 15 минут, что обусловлено особенностями метода измерения. Этого промежутка времени вполне достаточно для того, чтобы скрыть образование дендритов. Даже при предварительном напряжении 10 В результаты показали, что дендриты образуются, но не всегда видны на диаграмме SIR. Число образований дендритов значительно увеличивается при уменьшении расстояния между встречно-штыревыми контактами, а с увеличением образования дендритов можно заметить на диаграмме SIR соответствующее более сильное падение значения изоляции (рис. 8).

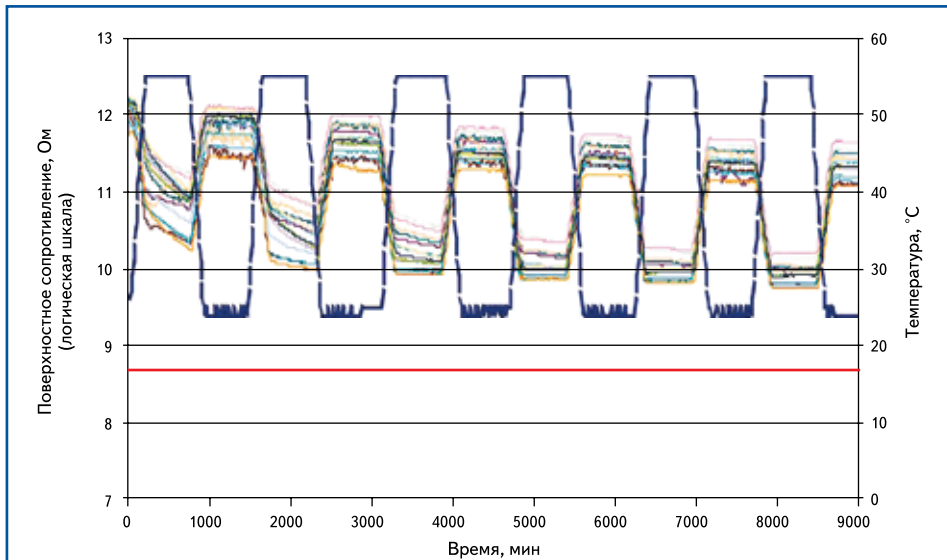
Встречно-штыревые контакты с покрытием демонстрируют, как изображено на рис. 9, после времени испытаний в 6 циклов значения сопротивления влажности и изоляции выше 500 МОм, даже во время фаз оттаивания.

Интересный результат был получен при измерении встречно-штыревых контактов печатной платы (рис. 7), при расстоянии между контактами 1300 мкм: хотя сначала и были получены приемлемые значения поверхностного сопротивления, но во время микроскопических измерений были обнаружены некоторые дендриты, значит, тест не был пройден.

Для основательной аттестации материалов покрытия, которые могут быть подвергнуты оттаиванию, может быть использовано испытание конденсационной влажностью. Нагрузка конденсационной влажностью — это метод испытаний, который широко используется для тестирования коррозионной стойкости.

Испытание конденсационной влажностью в соответствии с нормой ISO DIN EN ISO 6270-2 (изначально — DIN 50017) представляет собой симуляцию высокой влажности воздуха подобно тропическому климату или помещению с нагрузкой конденсационной влажностью. Нагрузка в таком случае происходит смесью из водяного пара и воздуха при 100% ОВ и 40 °С. Данное испытание проводится под названием «Постоянный климат конденсационной влаги».

Во время испытательной нагрузки образец подвергается длительной нагрузке конденсированной влажностью. На рис. 10 хорошо видны капли, образующиеся при оттаивании. Это испытание представляет собой осмотическую нагрузку материалов покрытия и субстрата



**Рис. 9.** Типичные значения сопротивления влажности и изоляции встречно-штыревых контактов с покрытием при циклическом испытании нагрузкой температурой и влажностью (стандарт BMW GS 95011-5:2001-08)

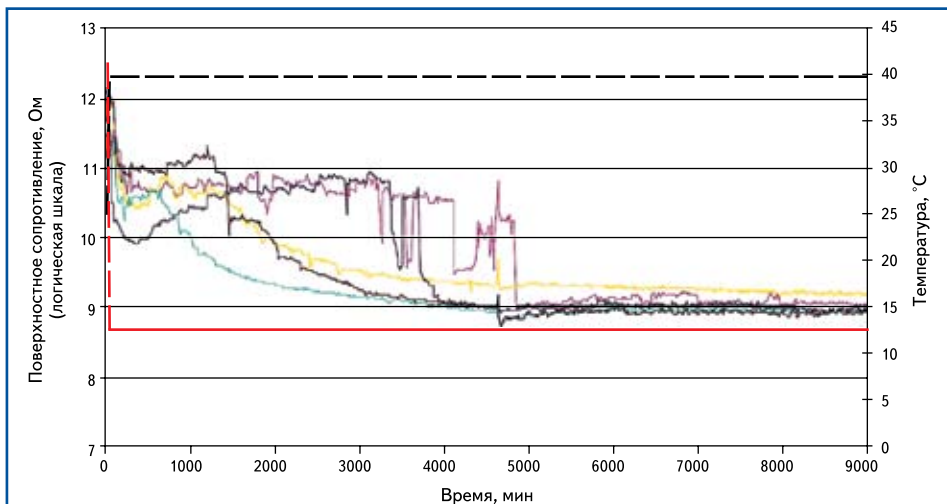
и очень хорошо показывает ионические загрязнения. При кратковременной нагрузке это испытание отображает реакцию на конденсированную влагу. При длительной нагрузке в более чем 30 дней это испытание переходит в тест на гидролитическую устойчивость.

В отличие от чисто гидролитического испытания на устойчивость в тестах на конденсационную влагу, при использовании напряжения (bias) могут быть измерены и электрические характеристики — сопротивление влажности и изоляции при конденсации влаги. Типичный ход кривых, в данном случае при ограниченном времени нагрузки в 150 ч, представлен на рис. 11. Падение сопротивления изоляции соотносится с влагопоглощением полимера при условиях оттаивания. Защитные лаки должны быть изготовлены таким образом, чтобы даже при конденсирующейся влаге при 40 °С они могли соответствовать нормам IPC с граничным значением сопротивления 500 МОм. После завершения испытания также учитывается регенерационная способность системы покрытия. В справочнике IPC 9201



**Рис. 10.** Пример электронного модуля с защитным покрытием на LED, подвергнутого оттаиванию при 40 °С и 100% ОВ продолжительностью более недели

данное испытание носит название «Тест тропического дождя» (Rain Forest Test), во время которого при электрическом напряжении необходимо учитывать электрическую миграцию. Это испытание можно применять в тех случаях, когда тестируются простые встречно-



**Рис. 11.** Сопротивление влажности и изоляции при оттаивании (40 °С/100% ОВ) на примере трех различных покрытий серий ELPEGUARD

штыревые контакты, которые обладают малой термической массой, и при этом для исследований желательна более длительная фаза оттаивания.

В то время как время оттаивания в различных испытательных циклах зависит от термической массы образца, это испытание позволяет провести аттестацию и характеристику материала покрытия при хорошо воспроизводимых тестовых условиях. Это испытание используется для описания системы защитного покрытия, при необходимости с учетом предварительных процессов, происходящих на встречно-штыревых контактах. Видно, что так называемая переходная фаза длится, как правило, не более 60 минут. Это означает, что приводящее к падению электрического сопротивления влагопоглощение представляет собой относительно быстрый процесс и протекает за время, определяемое минутами (рис. 2 и 9).

Строго говоря, испытание конденсационной влагой не совсем точно отображает реальные физические условия. При оттаивании в ходе термоцикла оттаивание происходит при достижении температуры ниже точки росы. Образуется температурный градиент между атмосферой и электронным модулем через защитное покрытие. Это означает, что точка росы может образовываться во время фазы оттаивания и на граничной поверхности, что может существенно влиять на силу адгезии неотвержденного лака. Этот эффект успешно используется для проверки качества в защите от коррозии так называемых дуплексных систем (покрытие на цинке). Однако сегодня нет оснований считать, что простое испытание конденсационной влагой является недостаточным для определения эффектов оттаивания.

### Заключение

Проведенные испытания нагрузкой температурой и влагой защитных лаков показывают, что при этой высокой нагрузке даже при оттаивании сохраняется эксплуатационная надежность. Для того чтобы исследовать эксплуатационную надежность после заданного времени экспонирования, особенно тщательно проверялись свойства электрической изоляции. Тесты на влагуостойчивость и сопротивление изоляции согласно ТМ 2.6.3.1 стандарта IPC-TM-650 показали, что в жесточенных условиях при 85 °C и 85% ОВ, а также при конденсируемой влаге при 40 °C с 50 В (bias), может сохраняться значение сопротивления изоляции более 500 МОм. Это значит, что при соответствующих материалах покрытия даже при высоких нагрузках температурой и влажностью можно достигнуть надежной защиты электронных узлов.

**Примечание.** Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen. 2009. № 5. Германия).

### Литература

1. BMW Group Standard GS 95011-4:2001-08, Technische Lieferbedingungen, Schaltungsträger in Kraftfahrzeugen, Betauungsprüfung.
2. 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.
3. Funke W. Permeabilitätsvorgänge in Anstrichfilmen. *Proceedings of Surface* 66. 1966.
4. Kamal M. R., Saxon R. Recent developments in the analysis and prediction of the weatherability of plastics. *Applied Polymer Symposia* 4:1-2. 19678.
5. Hummel W. Innovative Betauungssensorik — Sensorik und Feuchtemesstechnik, 5 // Konferenz 2008, Sensorik aus Thüringen — Zukunft und Wachstum durch Innovation und Kooperation.
6. IPC HDBK 830, Guideline for Design, Selection & Application of. Conformal Coatings.
7. IPC 9201. A Surface Insulation Resistance Handbook. 1996.
8. Leitfaden für die Anwendung und Verarbeitung von Schutzlacken für elektronische Baugruppen, Erarbeitet durch den GfKORR-Arbeitskreis. Korrosionsschutz in der Elektronik und Mikrosystemtechnik, zweite erweiterte Auflage. Juni 2007.
9. NIST National Institute of Standards and Technology — Information Technology Laboratory. Statistical Engineering Division, Engineering Statistics Handbook. Assessing Product Reliability.
10. Stannett V. The transport of gases in synthetic polymeric membranes — an historic perspective // *J. Membrane Sci.* 3, 1978.
11. Scherl R. Klimatische Anforderungen und Prüfungen im Automobilbereich für Elektronik. OTTI-Fachforum. Schutzmaßnahmen zur Klimasicherheit elektronischer Baugruppen. Regensburg, 2008, 2009.
12. Suppa M. Zuverlässigkeit von Beschichtungsstoffen für elektronische Baugruppen bei Belastung durch Temperaturdauerstress und Temperaturwechselstress. DVS/DMM-Tagung 08/09. Februar 2006, Fellbach.
13. Suppa M. Conformal Coatings and their Increasing Importance for a Safe Operation of Electronic Assemblies. *Circuit World*, Vol. 33 No. 4, 2007.
14. Tomlin P. E. A Method to Quantify the Surface Insulation Resistance Performance of Conformal Coatings Exposed to Different Temperature / Humidity Conditions. NPL Report CMMT(A) 271, 2000.
15. Vermeidung von Elektronik-Fehlern durch Feuchtigkeit. Auto-Jahresbericht 2004, VDA.