

Влияние температуры и влажности на электронное оборудование

02/10/2018 835 Автор: Шавиндер Сингла Перевод: Гавриков Вячеслав (г. Смоленск)

В большинстве случаев электронные устройства представляют собой печатную плату с расположенными на ней электронными компонентами. При создании электронных приборов необходимо соблюдать требования стандартов, определяющих конструктивные особенности, правила производства и сборки. Одной из организаций, разрабатывающих такие стандарты, является IPC.

По уровню надёжности все электронное оборудование можно разделить на три категории:

Устройства общего назначения Class-1

К этому классу относят электронные устройства, для которых на первом месте находится функционал печатной платы или сборки, а внешний вид не играет большой роли. Например, потребительские товары, внутренние модули компьютеров и периферийные устройства, а также некоторые военные приборы.

Электронные устройства специального назначения Class-2

К этой категории относятся устройства, от которых требуется высокая надёжность и длительный срок службы, при этом гарантированная бесперебойная работа является желательным, но не обязательным требованием. В качестве примера можно привести оборудование связи, сложное оборудование для бизнеса, инструменты и военные приборы.

Высоконадёжные электронные устройства Class-3

К этой категории относится коммерческое и военное оборудование, от которого требуется обеспечение непрерывной работы или постоянной готовности к работе. Незапланированные простои для этих

приборов не допускаются. В качестве примеров можно привести системы жизнеобеспечения и оружие.

Конечные продукты перечисленных классов отличаются функциональной сложностью, надёжностью, частотой проверок и тестирования. Вместе с тем границы между классами не являются жёсткими. Заказчик должен самостоятельно определить класс, к которому принадлежит продукт, указать его в техническом задании, а также перечислить любые исключения для тех или иных параметров.

Надёжность

Термин «надёжность» может иметь различные значения. Согласно ИРС: «Надёжность – это способность оборудования исправно работать в течение заданного интервала времени при различных условиях, без превышения числа прогнозируемых отказов».

В военных, промышленных, коммерческих и бытовых приложениях составные части электронных устройств могут быть очень чувствительны к условиям окружающей среды. Изучение влияния окружающей среды на работоспособность компонентов и систем, а также применение полученной информации на этапе проектирования позволяют повысить надёжность оборудования, сократить количество отказов и, следовательно, снизить затраты на техническое обслуживание.

Изучение влияния окружающей среды на работоспособность компонентов и систем.

Наиболее критичными параметрами окружающей среды с точки зрения электроники являются: влажность, температура, пыль и вибрация. В данной статье основное внимание уделяется оценке влияния температуры и влажности на электронные компоненты и печатные платы.

Тепловое воздействие

Сложность печатных плат постоянно возрастает, а, следовательно, увеличивается риск отказов, вызванных особенностями теплового режима работы электронных устройств.

Интегральные схемы

Работа десятков миллионов транзисторов, образующих интегральные микросхемы (ИС), неразрывно связана с потерями мощности. Генерируемое при этом тепло разогревает кристалл и частично отводится через корпус микросхемы. Превышение максимальной температуры приводит к тому, что ИС начинает работать некорректно или даже полностью выходит из строя.

Для ограничения потерь мощности и уменьшения перегрева ИС разработчики снижают рабочее напряжение и сокращают площадь кристалла. Однако уменьшение размеров кристалла также означает, что плотность размещения транзисторов возрастает. Таким образом, хотя в целом кристалл оказывается не таким горячим, локальный разогрев активных зон может быть значительным. Для защиты от локальных перегревов необходима реализация эффективных методов охлаждения. Если отвод выделяемого тепла не выполняется и не контролируется должным образом, то это приводит к сокращению срока службы микросхемы и даже к выходу её из строя.

После включения питания температура кристалла ИС поднимается до тех пор, пока не будет достигнуто тепловое равновесие с окружающей средой. Значение установившейся рабочей температуры влияет на величину наработки на отказ. На практике часто используют эмпирическое правило, согласно которому при каждом повышении температуры кристалла на 10 °С происходит удвоение частоты отказов для этого компонента. Таким образом, снижение температуры на 10...15 °С может удвоить срок службы устройства. Соответственно,

разработчики должны учитывать значение рабочей температуры, а также запас надёжности устройства.

Конденсаторы

Среди дискретных пассивных компонентов конденсаторы оказываются наиболее чувствительными к повышению температуры. Отсутствие компактных и термостабильных конденсаторов большой ёмкости является одним из наиболее значительных препятствий при разработке высокотемпературных приложений.

Для традиционных керамических диэлектрических материалов существует явная связь между диэлектрической проницаемостью и температурной стабильностью. Ёмкость COG или NPO конденсаторов, изготовленных из материалов с низкой диэлектрической проницаемостью, остаётся практически постоянной при изменении температуры и мало меняется с течением времени. Конденсаторы, изготовленные из материалов с высокой диэлектрической проницаемостью, например, X7R, отличаются большой ёмкостью при компактных габаритах. Однако величина ёмкости для них сильно зависит от температуры. Кроме того, токи утечки для X7R также возрастают при увеличении температуры, что затрудняет заряд конденсаторов.

К сожалению, существует не так много альтернативных вариантов. Например, стандартные лавсановые плёночные конденсаторы не могут использоваться при температурах выше 150 °C из-за возникновения механических разрушений и пробоя.

Некоторые полимерные материалы, в частности фторопласт, сохраняют механическую и электрическую стойкость при более высоких рабочих температурах. Они характеризуются минимальным изменением диэлектрической проницаемости и сопротивления изоляции даже после 1000 часов выдержки при 250 °C. Однако такие плёнки имеют очень

низкое значение диэлектрической проницаемости. Кроме того, изготовление тонких плёнок затруднено. Все это значительно снижает удельную ёмкость полимерных плёночных конденсаторов.

В результате, при создании высокотемпературных приложений самым лучшим вариантом становится использование батарей термостабильных керамических конденсаторов. Кроме того, новые керамические диэлектрические материалы демонстрируют улучшенную температурную стабильность благодаря использованию микроструктурирования или особых материалов с примесями титаната бария. В настоящее время наиболее перспективным материалом является X8R, который имеет удельную ёмкость на уровне X7R, но характеризуется минимальным изменением ёмкости при повышении температуры вплоть до 150 °С.

Резисторы

При протекании тока неизбежно выделяется тепловая энергия, по этой причине саморазогрев резисторов является нормальным явлением. Влияние температуры на параметры резисторов зависит от конструкции и характеризуется температурным коэффициентом сопротивления.

Температурный коэффициент определяет зависимость сопротивления от температуры. Он может быть как положительным, так и отрицательным. Как правило, композиционные резисторы имеют отрицательный температурный коэффициент, а металлопленочные и проволочные резисторы характеризуются положительным температурным коэффициентом. Это означает, что сопротивление композиционных резисторов уменьшается при повышении температуры, а сопротивление металлопленочных наоборот увеличивается.

Низкое значение температурного коэффициента говорит о том, что сопротивление слабо зависит от температуры. Высококачественные резисторы имеют низкий или даже нулевой температурный

коэффициент, что крайне важно для прецизионных и измерительных цепей.

Композиционные резисторы чаще других встречаются в электронных схемах. В них резистивный материал формируется в виде небольшого стержня или осаждается на изолированном сердечнике. Проволочные коаксиальные выводы подключаются с разных концов компонента. Снаружи резистор покрывается бакелитом для обеспечения изоляции. Номинал сопротивления обычно кодируется с помощью цветовой маркировки согласно EIA.

Стандартные номиналы сопротивлений лежат в диапазоне от долей Ома до нескольких МОм. Точное изготовление сопротивлений с небольшой погрешностью затруднено, впрочем, этого, как правило, не требуется. Обычно используются точность 5 и 10 процентов. Исходя из этих допусков, рассчитаны стандартные ряды номиналов, в которых сопротивления резисторов соседних номиналов не перекрываются даже при максимальной погрешности. Существуют также прецизионные резисторы для приложений, требующих чрезвычайно высокой точности. В них в качестве резистивного материала используется чистый углерод (с минимальным количеством примесей менее 1 %), который помещается в спиральную канавку на керамическом стержне.

Номинальная мощность выводных резисторов лежит в диапазоне от 1/4 Вт до 2 Вт. Чем выше мощность резистора, тем больше его габариты. Существует полезное правило по выбору мощности, согласно которому для обеспечения стабильной и надёжной работы фактическая рассеиваемая мощность резистора не должна превышать 50 процентов от номинального значения. Не стоит забывать, что мощность рассеивается в виде тепла, а избыточное тепло приводит к уменьшению сопротивления из-за отрицательного температурного коэффициента композиционных резисторов.

Перегрев может привести к повреждению резистора. По этой причине следует проявлять осторожность при пайке. Кроме того, чрезмерное нагревание приводит к изменению цвета корпуса резистора и полос цветового кода.

Говоря о размерах, стоит отметить, что габариты прецизионных резисторов у разных производителей отличаются. Это часто вводит в заблуждение, поскольку размеры прецизионных резисторов обычно больше, чем у резисторов со стандартными допусками. Однако стоят они в несколько раз дороже.

Как было сказано выше, сопротивление проволочных резисторов увеличивается при нагреве. Это изменение достаточно мало. Тем не менее, следует проявлять осторожность и обеспечивать минимальный перегрев для получения стабильного сопротивления. Резисторы должны быть установлены в местах со свободной циркуляцией воздуха и иметь двукратный запас по мощности. Другими словами, если расчеты показывают, что рассеиваемая мощность составляет 5 Вт, то следует выбирать резистор с номинальной мощностью 10 Вт. Хотя это правило является более важным для композиционных резисторов, чувствительных к перегреву, его следует соблюдать и в случае с проволочными резисторами.

Печатные платы и подложки

Печатные платы (ПП) и подложки (алюминиевые, керамические и др.) играют роль конструктивного основания, осуществляют отвод тепла и электрически связывают электронные компоненты. Однако при превышении некоторой предельной температуры они теряют работоспособность. Например, в печатных платах на основе стеклотекстолита пропитывающий компаунд переходит в текучее состояние при температуре стеклования, а сама плата деформируется из-за сильной неоднородности тепловых коэффициентов расширения по

разным осям. Эти изменения приводят к отслаиванию медных токопроводящих дорожек и ухудшению изоляционных свойств ПП.

Как было сказано выше, печатные платы выполняет функцию отвода тепла. Стандартные ПП на базе стеклотекстолита FR-4 имеют температуру стеклования менее 135 °С, хотя существуют высокотемпературные версии с рабочими температурами до 180 °С. Платы на основе бисмалеимид триазина (BT), цианатного полиэфира (CE) или полиимидных материалов, могут использоваться при температурах до 200 °С или даже выше. Кварцево-полиимидные платы сохраняют работоспособность вплоть до 260 °С. Платы, изготовленные из фторопласта (ПТФЭ) имеют температуру стеклования T_g более 300 °С, однако их не рекомендуется использовать при температурах выше 120 °С из-за слабой адгезии меди. Наличие медного слоя значительно улучшает тепловые характеристики печатной платы, поскольку ее теплопроводность оказывается в 1000 раз выше, чем, например, у «голового» FR-4.

Продуманная компоновка печатной платы с грамотным распределением наиболее греющихся элементов позволяет достигать отличных результатов без каких-либо дополнительных затрат. Использование медных полигонов и массивных контактных площадок для отвода тепла от компонентов, а также применение металлизированных отверстий и сплошных медных слоёв помогает значительно снизить тепловое сопротивление.

Интегральные микросхемы становятся все быстрее и мощнее, а размер печатных плат сокращается. Современные компактные ПП (например, в смартфонах и планшетах), а также высокопроизводительные электронные компоненты требуют более эффективного охлаждения по сравнению с предшественниками. Это связано с тем, что увеличение плотности расположения компонентов

приводит к росту удельной генерируемой мощности, из-за чего электронике приходится работать при повышенных температурах. В результате разработчики вынуждены прикладывать больше усилий для обеспечения качественного отвода тепла.

Паяные соединения

Конструктивные материалы в большинстве случаев используются при температурах, не превышающих половину от температуры плавления. Однако, технология поверхностного монтажа предполагает, что припой будет обеспечивать не только электрический контакт, но и механическую поддержку при температурах, значительно превышающих этот ориентир.

Разогрев эвтектического припоя до 100 °C соответствует 80% от температуры плавления, при этом начинает проявляться свойство текучести. Выше этой температуры прочность на сдвиг уменьшается до недопустимого уровня. Кроме того, при разогреве повышается риск образования медно-оловянных интерметаллидов, которые приводят к повышению хрупкости и усталости паяных соединений. Существуют припои, которые сохраняют свои механические свойства при температурах вплоть до 200 °C.

В настоящий момент для уменьшения воздействия свинца на природу и здоровье людей идёт активный переход на бессвинцовые технологии. Вместе с тем такой переход приводит к возникновению целого ряда проблем с надёжностью, технологичностью, доступностью и конечной стоимостью электроники. Дело в том, что по механическим, тепловым, электрическим и технологическим свойствам большинство предлагаемых материалов и сплавов уступает свинцово-оловянному (Pb-Sn) припою. При монтаже бессвинцовые припои требуют более высокой температуры плавления, около 260 °C, в то время как для традиционных припоев Pb-Sn температура плавления составляет 245 °C.

Дополнительный нагрев значительно увеличивает вероятность повреждения компонентов и ПП в процессе монтажа. Кроме того, стоимость бессвинцовых припоев оказывается выше. На сегодняшний день переход на бессвинцовые технологии не завершён.

Подводя итог для данного раздела, можно отметить, что перегрев электронного устройства ограничивается самой низкой из допустимых температур для используемых компонентов, в том числе, печатной платы, припоя, электронных компонентов (разъёмов, ИС, пассивных элементов и т. д.).

Часть тепла от компонентов отводится за счёт конвекции воздуха. Однако в процессе работы сам воздух начинает разогреваться. Если в корпусе электронного прибора отсутствует вентиляция, то температура будет постоянно повышаться, а, значит, эффективность отвод тепла от компонентов будет снижаться.

Выполнение теплового анализа в процессе проектирования электронного устройства позволяет оптимально разместить компоненты и, тем самым, предотвратить возникновение проблем с охлаждением. Это, в свою очередь, сводит к минимуму или полностью устраняет необходимость в дорогостоящих изменениях, вносимых на заключительных этапах разработки. Современные электронные устройства состоят из множества элементов, таких как печатные платы, вентиляторы, вентиляционные отверстия, перегородки, экраны электромагнитного излучения, фильтры, кабели, блоки питания и т.д. Эти элементы дополнительно усложняют тепловой анализ. В настоящий момент существуют автоматизированные системы проектирования, помогающие разработчикам справиться со сложной задачей теплового моделирования. Эти программные инструменты предоставляют дружественный графический инструмент и позволяют осуществлять быстрые и точные расчёты.

Влияние влажности

Влажность характеризует количество влаги в воздухе. Разделяют абсолютную и относительную влажность. Абсолютная влажность определяет массу водяного пара в единице объёма воздуха. Она измеряется в граммах на кубический метр (г/м³). Относительная влажность – это отношение абсолютной влажности к теоретическому максимуму при заданной температуре и давлении. Относительная влажность выражается в процентах. Таким образом, если воздух удерживает половину влаги от максимального количества, то относительная влажность составляет 50 процентов.

Разрушительное воздействие влажности на электронное оборудование очень часто недооценивается. Последствия от попадания влаги зависят от используемых материалов.

Повышенная влажность способна наносить прямой урон электронике, например, в виде расклеивания печатных плат. Кроме того, негативное влияние влажности может носить неявный характер. В частности, повышенная влажность является фактором, усугубляющим коррозию.

Прямое воздействие высокой влажности

Рассмотрим основные негативные последствия от воздействия высокой влажности.

Деградация. Влажность снижает эффективность оборудования, работающего в инфракрасном диапазоне, а также ухудшает свойства некоторых материалов, таких как ткани, некоторые пластмассы и целлюлоза.

Расклеивание. Повышенная влажность приводит к расклеиванию (деламинации) дешёвых печатных плат.

Деформация. Наличие повышенной влажности может вызывать не только деформацию, но и набухание волокнистых материалов.

Разрушение волокнистых материалов. Волокнистые материалы с высокими показателями гигроскопичности при воздействии влаги ухудшают прочность на растяжение и испытывают значительные деформации.

Поверхностное сопротивление. Наличие влаги уменьшает поверхностное сопротивление. В свою очередь снижение поверхностного сопротивления печатной платы может повлиять на характеристики прецизионных времязадающих цепей (что приводит к изменению частоты генератора), шунтировать выходной ток источника тока, привести к потере чувствительности или уменьшить входное сопротивление высокоимпедансных усилителей.

Миграция металлов. Процесс электролитического переноса ионов металла (миграция металлов) происходит между близко расположенными проводящими металлическими проводниками при наличии влаги и разности потенциалов (рис. 2, рис. 3). Миграция особенно характерна для серебра. Наличие миграции металлов приводит к снижению сопротивления изоляции, увеличению токов утечки и даже к возникновению катастрофических коротких замыканий. Миграция металлов является частой причиной отказов микросхем.

Опыт по изучению миграции металлов при наличии воды. Для серебряно-платинового толстопленочного проводника короткое замыкание возникает уже через 25 минут при приложении постоянного напряжения 4 В

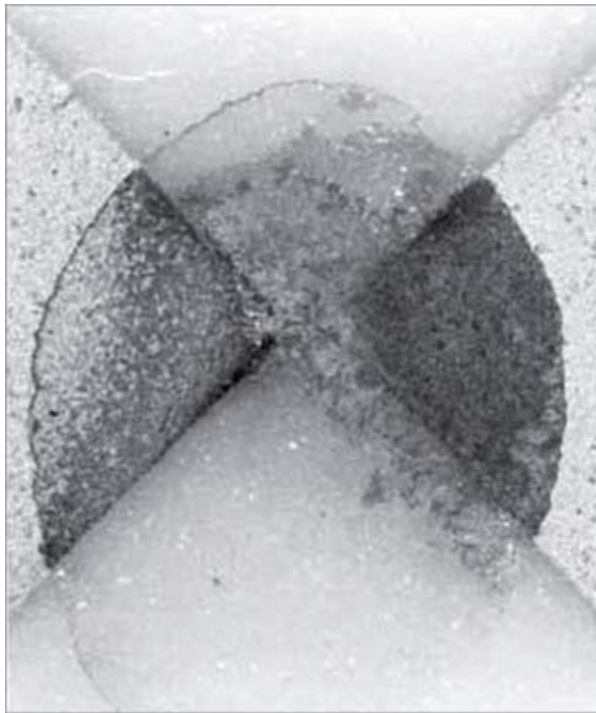


Рис. 2. Опыт по изучению миграции металлов при наличии воды. Для серебряно-платинового толстопленочного проводника короткое замыкание возникает уже через 25 минут при приложении постоянного напряжения 4 В

Опыт по изучению миграции металлов при наличии воды. Для золотого толсто пленочного проводника при приложении напряжения 4 В спустя 1 час миграция металлов не наблюдается

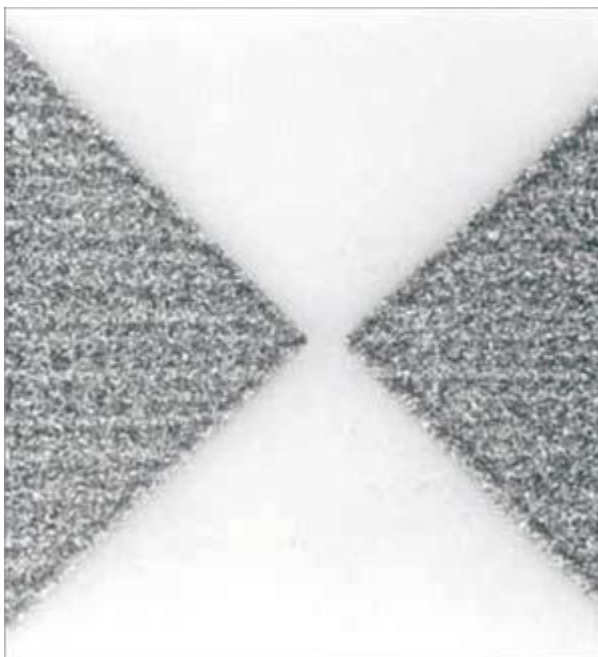


Рис. 3. Опыт по изучению миграции металлов при наличии воды. Для золотого толсто пленочного проводника при приложении напряжения 4 В спустя 1 час миграция металлов не наблюдается

Возникновение пор из-за выделения газов от материалов ПП. В процессе монтажа компонентов в паяных соединениях могут появляться полости и поры, которые возникают из-за выделения газов. Подобные явления создают массу проблем:

В однослойных и двухслойных платах. При воздействии высоких температур влага, абсорбированная компаундами ПП во время длительного хранения, начинает высвобождаться и закипать, формируя полости в паяных соединениях, а также разрушая переходные и монтажные отверстия.

В многослойных платах разрушение переходных или монтажных отверстий может нарушать целостность электрических соединений с проводниками не только внешних, но и внутренних слоев, что приводит к дорогостоящему ремонту.

Неявные последствия от воздействия высокой влажности

Отсутствие должного уровня чистоты при производстве электронных устройств может стать дополнительной причиной ухудшения электрических характеристик. Рассмотрим основные источники загрязнений, которые способны вызвать выход из строя электронных приборов в процессе длительной эксплуатации.

Производство печатных плат. Загрязнение может возникнуть во время производства ПП и обычно является следствием неполного отверждения смолы или некачественного нанесения паяльной маски.

Остатки флюсов. Входной импеданс устройств может изменяться при воздействии влаги, накопленной в остатках флюса на ПП. При использовании ручной пайки некоторые современные безотмывные синтетические флюсы не достигают температуры дезактивации. При длительном воздействии высокой влажности на месте остатков флюса возникает белый органический солевой налёт, который хотя и не имеет существенной проводимости, тем не менее, может легко улавливать влагу. Это в свою очередь влияет на поверхностное сопротивление. Кроме того, этот солевой налёт становится идеальной средой для миграции металлов.

Электролитическая коррозия. Обычно коррозия требует наличия влаги и растворимых примесей, которые могут присутствовать как на поверхности материалов, так и в окружающем воздухе. Вместе влага и примеси образуют электролит, необходимый для электрохимической реакции – коррозии. Реакция происходит, если разнородные металлы находятся в непосредственном контакте или полости между ними заполнены электролитом. При этом для коррозии не обязательно наличие видимой влаги, будет вполне достаточно сверхтонкой водяной плёнки.

Наличие разности потенциалов и проводящего электролита на поверхности ПП также способствует отслаиванию металлических проводников и миграции металлов, что в свою очередь приводит к коротким замыканиям.

Попадание влаги в рабём вызывает коррозию контактов. В результате сопротивление электрического соединения возрастает, а сам контакт разогревается. При значительном повышении температуры возможно возникновение пожара.

Влияние низкой влажности

Низкая влажность также может стать проблемой. Это в первую очередь касается гигроскопичных материалов, которые при удалении влаги деформируются, становятся хрупкими, теряют вес и объем.

Проблемы со статикой

Поломку электронных устройств из-за статики обнаружить достаточно сложно. Дело в том, что статические разряды могут приводить к значительным разрушениям, которые уничтожают «свидетельства» участия статики. Электронные компоненты наиболее уязвимы в момент выполнения монтажа на печатную плату. Рассмотрим особенности воздействия статики.

Накопление пыли. Статический заряд притягивает пыль. Накопление пыли в негерметичном блоке может привести к поломке, например, в высоковольтных устройствах (телевизорах, мониторах и др.), где пыль становится идеальным путем для распространения пробоя.

Генерация статического заряда. Генерация статического заряда сильно зависит от уровня влажности. Напряжения до 20 кВ могут генерироваться человеком, идущим по ковру, если уровень относительной влажности ниже 30%. При высокой влажности та же прогулка приведёт к возникновению меньшего заряда 1,5 кВ. Очевидно,

что при отсутствии антистатических мер заряд, накопленный человеком, может повредить устройство.

Чувствительность к статике. Даже невысокие напряжения могут вызвать пробой электронных компонентов. Например, небольшой разряд 30 В способен разрушить затвор МОП-транзистора, если толщина оксида кремния в структуре транзистора мала.

Меры защиты

Органические покрытия широко используются для защиты печатных плат не только от влаги, но и от повышенной температуры. Эти покрытия были специально разработаны для отвода большого количества тепла при высоких температурах в течение коротких периодов времени. Среди них термически стойкие составы, которые используются для защиты компонентов, работающих в ракетной технике. Их наносят на термочувствительные детали, такие как электронные шкафы или блоки управления соплами, что обеспечивает защиту от повышенных температур до 1650 °С во время запуска ракетных двигателей.

При разогреве наружные слои защитного слоя разлагаются и обугливаются, поглощая значительное количество тепла, в то время как внутренние слои остаются относительно холодными. Очевидно, что толщина покрытия должна быть достаточной для того, чтобы защищать компоненты в течение всего теплового воздействия.

Для защиты блока управления сопла ракеты Minuteman во время взлёта использовались покрытия, состоящие из смеси эпоксидов и силиконов. Аналогичное покрытие применялось на капсуле Apollo для защиты астронавтов от перегрева при входе в атмосферу Земли.

Особые покрытия используются для защиты электронных блоков от огня. Они содержат наполнители или молекулярные структуры,

которые разлагаются и выделяют газы, подавляющие горение, например углекислый газ.

Среди лучших неметаллических теплопроводящих наполнителей следует отметить бериллий, нитрид алюминия, нитрид бора и алмаз. В то же время эффективность защитных покрытий ухудшается, если поверхность устройства не полностью очищена от остатков флюса, отпечатков пальцев, а также любых других химических веществ, используемых при производстве электронных блоков.

Помимо температуры и влажности электронные узлы должны быть защищены от других негативных факторов окружающей среды: соли, тумана, истирания, излучения, воздействия микроорганизмов и т. д.