

Надежность фотоструктурированных паяльных масок для электронных узлов при постоянной и циклической температурной нагрузке

В современном автомобиле год от года появляется все больше электронных модулей, при этом требования их эксплуатации постоянно ужесточаются. В связи с этим увеличивается значение максимальной циклической нагрузки печатных плат (ПП) и условия тестирования термоциклированием. Какое влияние данная нагрузка оказывает на паяльную маску, а также на изоляционные свойства, особенно при последующей климатической нагрузке? В данной статье проанализированы результаты испытаний при температурной нагрузке (150 °С, 2000 часов) и термоциклировании (1000 циклов, -40/+150 °С).

Манфред Зуппа,
д. т. н.

manfred.suppa@peters.de

Перевод: Андрей Новиков

andrej.novikov@uni-rostock.de

Факторы нагрузки

Фактор напряжения в представленных процессах — тепловая энергия, которая характеризуется температурой. Тепловая энергия ведет к изменению в материалах, как в полимерах, так и в металлах. При увеличении температуры материалов возрастает склонность к спонтанному увеличению энтропии, то есть склонность к необратимым изменениям. В источнике [1] приведен список соответствующих дальнейших факторов нагрузки, которые оказывают влияние на надежность.

В области автомобильной электроники тема факторов нагрузки и связанных с ними отказов особенно актуальна, не в последнюю очередь из-за постоянно возрастающего количества электронных модулей в автомобиле. Данные электронные модули располагаются ближе к агрегатам и в связи с этим подвергаются все большей нагрузке. Согласно данным от производителей автомобилей, разброс температур составляет от -40 °С до области от +80 °С (внутри автомобиля) до +800 °С (датчики выхлопных газов). Стандартная ПП из материала FR4 не может быть использована во всем этом диапазоне, а только от -40 °С до области от +120 °С до +150 °С [2, 3]. Данная температурная нагрузка результируется из температуры окружающей среды и так называемого собственного нагрева, который возрастает при увеличивающейся плотности монтажа. Так, например, в электронных модулях, расположенных вблизи мотора, можно наблюдать увеличение температуры от +105 °С до +150 °С. При нагрузке с более высокими значениями температуры происходят изменения согласно второму закону термодинамики. В связи с этим нагрузка, вызванная более высокой температурой, обозначается термином «температурный стресс» [3].

Температурное рассогласование

Наряду с основными термическими процессами должны быть также рассмотрены комбинированные нагрузочные испытания. В подобных испытаниях электронные узлы подвергаются циклической температурной нагрузке с широким температурным диапазоном. В данном случае, особенно при комбинации различных материалов, к температурной нагрузке добавляется механическая — в силу различных температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР). Это явление обозначается температурным рассогласованием (в англоязычной терминологии — thermal mismatch).

Модуль упругости материалов играет особенно важную роль при циклической температурной нагрузке. В электронном узле всегда существует рассогласование ТКЛР различных материалов (базовый материал, медь, припой, компоненты и т. д.), которое ведет к различным перемещениям и, тем самым, к напряжениям при смене температур.

В упрощенной форме эти температурные расширения и их механические последствия (механическое напряжение между отдельными элементами электронного модуля) могут быть описаны следующим образом:

$$\sigma = E_2 / (1 - \mu_2) \times (\alpha_2 - \alpha_1) \times \Delta T,$$

где σ — механическое напряжение; E — модуль упругости; μ — значение Пуассона (значение поперечного сжатия); α — ТКЛР; ΔT — разница температур.

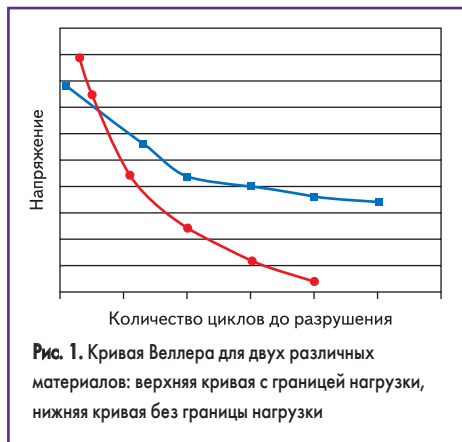
Наряду с разницей температур и различных ТКЛР решающую роль в переносе напряжений играет модуль упругости. Чем выше значение модуля упругости, тем выше напряжение. Значения модулей упругости используемых материалов могут различаться друг от друга на фактор 1000 и более [4].

Что такое усталость?

Изменения свойств материалов, вызванные постоянной сменой небольших нагрузок, описываются как усталость. Усталость может проявиться также при нагрузке в области эластичной деформации [5]. Данные механизмы усталости являются необратимыми процессами, которые незначительно зависят от температуры и не могут быть описаны уравнением Аррениуса.

Кривая Веллера и ее значение

Диаграмма амплитуды напряжения σ , которое вызывает усталостное разрушение после определенного количества циклов N , называется кривой Веллера. Зачастую эта кривая показывает граничное значение, при превышении которого элемент конструкции подвержен опасности усталостного разрушения (рис. 1). Указание на кривую Веллера служит предупреждением не увеличивать без причины диапазон температур с целью получения дополнительной информации о надежности электронных узлов в ходе испытаний.



Термоциклирование

Многие специалисты занимаются вопросом допустимого количества термоциклов для ПП и электронных модулей, устанавливают параметры нагрузки и проводят испытания. Главная причина отказа электронных модулей при высокотемпературной нагрузке — образование трещин в металлизации сквозных отверстий ПП [6].

Для определения стойкости к нагрузке термоциклированием используются различные методы. К основным методам относятся:

- термоциклирование (TWT — Temperaturwechseltest);
- нагрузка межсоединений (IST — Interconnect Stress Test);
- термоциклирование с контрольными измерениями сопротивления с 4 зондами и температуры до 40 каналов (TCT Comfort 40 — Thermal Cycle Test with Control Measurements Four-point Resistance and Temperature with up to 40 Channels).

В методах тестирования IST и TCT Comfort 40, в первую очередь при испытании надежности медной металлизации сквозных отверстий, термоциклирование дополнено электрическими измерениями. Тем самым деградация металлизации отверстий может быть

напрямую зафиксирована. Обычного термоциклирования для подобного тестирования недостаточно [7].

Иначе выглядит определение стойкости паяльных масок при нагрузке термоциклированием. Возможные отказы заключаются в охрупчивании, образовании трещин и отслоении и не могут быть зафиксированы, в том числе с помощью электрических измерений, в ходе тестирования. Недостатки метода термоциклирования — определение времени отказа только с определенными интервалами и детектирование отказов лишь с помощью оптической инспекции.

Возникает вопрос, какое влияние оказывает подобная нагрузка на применяемые системы полимеров, особенно на паяльные маски? Каких изменений изоляционных свойств можно ожидать, особенно при последующей климатической нагрузке? В данной статье представлены и обсуждены результаты относительно возможного повреждения ПП после испытаний при температуре 150 °C продолжительностью более 2000 часов и термоциклирования более 500 циклов при $-40/+150$ °C [8].

Температурная нагрузка полимеров

При температурной нагрузке в полимерах происходят более или менее явно выраженные необратимые изменения структуры. Они ведут в свою очередь к изменению механических и электрических свойств.

В электронных узлах температурная нагрузка должна быть разделена на две категории. Для начала следует назвать температурную нагрузку, вызванную процессом пайки. Данная температурная нагрузка значительно превышает (хотя и кратковременно) значение термостойкости всех элементов электронного узла. Но эта нагрузка и ее последствия намеренно не рассматриваются в данной статье, так как в случае отказа они были бы отнесены к категории ранних отказов вследствие дефектов материала или ошибок в технологическом процессе [9].

Температурная нагрузка в ходе эксплуатации может быть рассмотрена как температурная стойкость к старению, и ее значение отличается от температуры разрушения полимеров. Согласно определению, температурное старение может быть оценено как коррозионный процесс.

В полимерах температурный процесс старения протекает по-разному, и механизмы старения изменяются в зависимости от условий эксплуатации и нагрузки. Испытания температурной нагрузкой для определения изменений свойств были проведены согласно немецкой промышленной норме DIN EN 60216 [10].

При испытании температурной стойкости должны быть учтены различные факторы, которые могут оказывать значительное влияние на результаты исследований. При нагрузке полимеров или систем лаков большое значение имеет относительная влажность. Стойкость полимеров к влажному теплу, как правило, значительно ниже, чем к сухому, так как при повышенной влажности одновременно с тем-

пературными процессами старения также происходит гидролитический процесс разложения. Типичные гидролитические тесты на стабильность проводятся при температуре 85 °C и относительной влажности >85% с продолжительностью 21 день и более.

Важно и проявление стойкости при нагрузке термоциклированием. Это означает, что система лаков, которая в ходе температурной нагрузки чаще подвергается охлаждению и нагреву, возможно, раньше разрушится, чем система лаков, которая при той же продолжительности тестирования и той же максимальной температуре подвергается постоянной температурной нагрузке. Скорость смены температуры может также оказывать влияние.

Долгосрочная температурная нагрузка системы лаков обычно ведет к охрупчиванию, пожелтению, потускнению, изменению электрических свойств и, возможно, к потере адгезионной прочности. Изменению электрических свойств должно быть уделено особое внимание.

При долгосрочной нагрузке постоянной температурой могут также происходить процессы разложения, обусловленные влажностью. Необходимо учитывать, что при температуре 150 °C в температурном шкафу происходит заметное снижение значения относительной влажности, но значение влажности воздуха снаружи, а именно 10,3 г/м³ при 50% относительной влажности и температуре 23 °C, не изменяется. Тем самым, количество влажности в кубическом метре воздуха остается неизменным, изменяется лишь относительное количество до максимального насыщения.

Нагрузка постоянной температурой

При невозможности проведения ускоренных испытаний за счет увеличения температуры в связи с указанными предельными условиями, необходимо установить корреляцию между продолжительностью температурной нагрузки и желаемым сроком эксплуатации. Подобная корреляция может быть определена на основе реальных условий эксплуатации. Так, например, электронный прибор управления в автомобиле при сроке эксплуатации 15 лет и пробеге автомобиля 240 000 километров, что соответствует сроку эксплуатации 6000 часов, подвергается температурной нагрузке, представленной в таблице 1 [11].

Были проведены исследования стойкости паяльных масок при нагрузке постоянной температурой со значениями 140 °C и 150 °C и продолжительностью от 500 до 2000 часов. Тестовые ПП (печатные платы IPC-B-25-A, базовый материал FR4) были предварительно

Таблица 1. Продолжительность нагрузки и температура эксплуатации в автомобиле

Температура эксплуатации, °C	Продолжительность нагрузки, ч
$T_{u_{min}} = -40$	360 (6%)
$T_u = 23$	1200 (20%)
$T_{u_{max}} = 105 (-20 K)$	3900 (65%)
$T_{u_{max}} = 125$	540 (9%)

обработаны. Для учета возможных «предварительных повреждений» тестовые ПП подвергались «предварительной нагрузке», сравнимой с нагрузкой электронных узлов. Подготовка тестовых плат включала в себя изготовление различных типичных финишных покрытий, таких как ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold), ImmSn (Immersion Sn) и HAL (Hot Air Levelling). После этого тестовые платы подвергались многократному процессу пайки (2 раза пайка оплавлением и 1 раз пайка волной). Затем проводилась температурная нагрузка при 140 °С или 150 °С в температурном шкафу с циркуляцией воздуха.

Главные вопросы — как после данной нагрузки должен выглядеть электронный модуль, и какими характеристиками обладают отдельные элементы данного модуля? К паяльной маске как к диэлектрику предъявляются следующие требования [12]: «Надежность диэлектрика предполагает, что ионные загрязнения из окружающей среды или возникающие за счет коррозии или электромиграции электропроводящие частицы не могут образовываться вкуче с влажностью электропроводящих соединений, например, между проводниками, контактными площадками и т. д. на поверхности одного слоя печатной платы с проводниками или между системами проводников различных слоев печатной платы».

В связи с этим были исследованы изоляционные свойства тестовых ПП при нагрузке постоянной температурой со значениями 140 °С или 150 °С.

Согласно теории Аррениуса, при увеличении температуры на 10 К срок эксплуатации сокращается вдвое или нагрузка увеличивается в два раза. В настоящее время максимальная нагрузка ПП из материала FR4 или модифицированного материала FR4 находится в этой области температур. В качестве измеряемого параметра была определена влагостойкость и сопротивление изоляции в соответствии с ТМ 2.6.3.1 нормы IPC-TM-650 при 40 °С и 90% относительной влажности, а также при 85 °С и 85% относительной влажности и напряжении в 50 В_{BIAS}.

Измеренные значения сопротивлений превышают 500 МОм и находятся выше граничных значений, указанных в норме IPC-SM-840 (рис. 2). Даже при нагрузке тестовых ПП (85 °С

и 85% относительной влажности), несмотря на повышенную климатическую нагрузку, были зафиксированы значения сопротивления изоляции выше нижней границы в 100 МОм.

Нагрузка термошоком

Главная тема — повышенные требования к стойкости электронных модулей при циклической температурной нагрузке. В первую очередь, требования автомобильной промышленности представляют собой движущую силу для дальнейшего технологического развития. Анализ основной области отказов при высокотемпературной эксплуатации электронных узлов приводит к необходимости изучения поведения паяльных масок при данных критериях тестирования.

При нагрузке термоциклированием, наряду с граничными значениями температуры, также важна скорость смены температур. Так, например, различают «жесткое» термоциклирование со временем смены температуры от менее 10 до 30 секунд, так называемый термошок, и «мягкое», или медленное термоциклирование со скоростью смены температуры 1–3 К/мин. Дифференцированное рассмотрение «жестких» и «мягких» режимов термоциклирования представляет собой особую тему и поэтому не рассматривается в данной статье. Согласно накопленному опыту и договоренности с рабочей группой «Циклостойкость печатных плат» подразделения производителей печатных плат в Центральном союзе электротехнической и электронной промышленности Германии (ZVEI/VdL — Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie/Verband der Leiterplattenindustrie) были проведены исследования с использованием «жесткого» режима термоциклирования. Были установлены условия тестирования [13]:

- граничные значения температур: $T_{\max} = 130...150\text{ °С}$, $T_{\min} = -40\text{ °С}$;
- время смены температур: <10 с;
- время задержки при граничных значениях температур: 30 мин;
- количество циклов: 500 (1000)...3000.

Основная причина отказов при термоциклировании — образование термомеханического напряжения за счет различия в ТКЛР [1]:

$$N_f \sim \Delta T - 1/c,$$

где N_f — количество циклов до отказа; c — это константа, зависящая от условий смены температур; ΔT — разница температур.

Наряду с образованием напряжения вследствие различных ТКЛР, которые могут привести к отказам, с помощью данного метода испытаний могут быть зафиксированы проявления усталости материалов [14]. Из представленного уравнения, в отличие от температурной деградации согласно Аррениусу, не может быть вычислен фактор ускорения.

Стойкость к термошоку всех паяльных масок должна быть испытана согласно норме IPC-SM-840 (табл. 2). Граничные значения температур составляют при этом –65 °С и +125 °С. Должны быть проведены 100 циклов со време-

нем для смены температуры менее 2 минут и задержкой при граничных значениях температуры 15 минут. Оценка проводится с помощью оптической инспекции таких дефектов, как трещины, отслоение, образование пустот и т. д.

Таблица 2. Нагрузка термоциклированием

Нагрузка	Спецификация
100 циклов –45 °С/+125 °С Задержка при крайних значениях: 15 минут	IPC-SM-840 С, ТМ 650, 2.6.7.1, класс Т
100 циклов –65 °С/+125 °С Задержка при крайних значениях: 15 минут	IPC-SM-840 С, ТМ 650, 2.6.7.1, класс Н

Класс электроники Т (телекоммуникация) включает в себя компьютерную технику, телекоммуникационное оборудование и высококоразвитую промышленную электронику. Паяльные маски на печатных платах данного класса могут быть использованы для массовых и промышленных продуктов с высокой производительностью, в которых необходим долгий срок эксплуатации, но прерывание их эксплуатации не представляет собой опасность для жизни человека.

Класс электроники Н (высокая надежность, военная техника) включает в себя оборудование, в котором также необходим долгий срок службы. Прекращение работы оборудования или отказ не допускаются. Паяльные маски данного класса могут быть использованы в областях с высокими требованиями к уровню надежности, в которых важно непрерывное функционирование, как, например, в оборудовании, которое имеет функцию сохранения жизни.

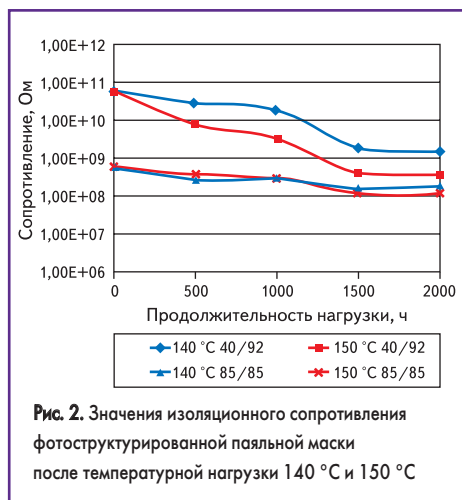
Паяльные маски, представленные на рынке, выполняют эти требования согласно норме IPC-SM-840 С. Наряду с этим электронные модули для применения в автомобилях также подвергаются испытаниям термоциклированием с определенной классификацией для различных автомобильных спецификаций (табл. 3).

Таблица 3. Классификация термоциклирования в области автомобильной электроники

Область температур, °С	Количество циклов
–40...+85	200
–40...+110	до 500
–40...+125	до 500
–40...+140	до 1000
–40...+160	до 1000

Большое количество циклов и высокое значение температуры ведут не только к механической нагрузке и усталостным проявлениям, но и к проявлениям старения за счет выдержки при высокой температуре и тем самым также относятся к нагрузке.

В проекте hotEL (Hochtemperatur Elektronik — высокотемпературная электроника) было установлено, что особое внимание должно быть уделено выбору компонентов. Так, например, в стабильных, с первого взгляда, материалах печатных плат было обнаружено образование трещин [15]. В соответствии с этим в дальнейших исследованиях был использован как циклостойкий базовый материал, так базовый материал, который был признан в проекте hotEL нециклостойким.



Согласно требованиям, предъявляемым к диэлектрикам, в дополнение к оптической инспекции в соответствии с нормой IPC-SM-840 были также исследованы электрические свойства во время температурной нагрузки. Термоциклирование с продолжительностью 1000 циклов с задержкой при максимальном значении температуры соответствует 500 часам испытания при постоянной температуре. Условия испытания термоциклированием согласно норме IPC не могут быть просто перенесены на представленные выше условия термоциклирования, так как при этом не могут быть учтены проявления старения при высоких значениях температуры после 100 циклов (что соответствует 250 часам выдержки).

При оптической инспекции тестовых ПП ни до, ни после циклического воздействия температуры и влажности не было обнаружено образования трещин, отслоений, пустот и прочих дефектов слоя паяльной маски. Даже в острых углах отверстия в паяльной маске, которые считаются особенно критическими местами, не было обнаружено образования трещин (рис. 3).

Внутрифирменные испытания термоциклированием показали, что подобное образование трещин, особенно исходящее от углов отверстий в паяльной маске, может быть спрово-

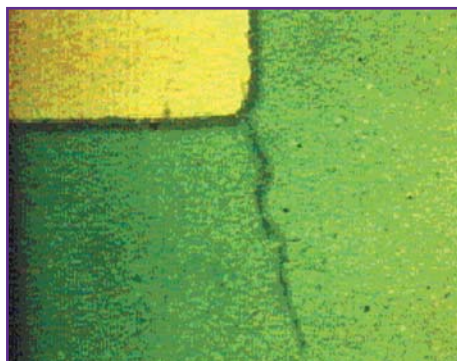


Рис. 4. Детальный снимок отверстия в паяльной маске LPI5M после 1000 циклов при $-40/+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (нестабильный базовый материал при нагрузке термоциклированием).
Для лучшего сравнения данный рисунок увеличен в 8 раз по сравнению с рис. 3

цировано или предотвращено выбором базового материала. Было установлено заметное влияние базового материала. В то время как в паяльной маске на стандартной ПП из FR4 уже после около 500 циклов возникают первые трещины (рис. 4), в точно такой же маске на циклостойком базовом материале подобных трещин нет даже после 2000 циклов (рис. 3). Это отмечено и в материалах проекта hotEL [16].

Если образование трещин в паяльной маске зависит от типа ПП, то трещина в покрытии не является усталостной, и ее причину следует искать скорее во взаимодействии с субстратом.

Влагостойкость и сопротивление изоляции были определены в соответствии с ТМ 2.6.3.1 нормы IPC-TM-650 для различных значений влажности и температуры в области от $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 90% относительной влажности до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 85% относительной влажности с напряжением $50\text{ V}_{\text{BIAS}}$ (рис. 5). Все измеренные значения сопротивления составляют более $500\text{ M}\Omega$ и тем самым находятся выше так называемой границы IPC из нормы IPC-SM-840. Даже при нагрузке тестовых ПП $85\text{ }^{\circ}\text{C}/85\%$ относительной влажности, несмотря на повышенную

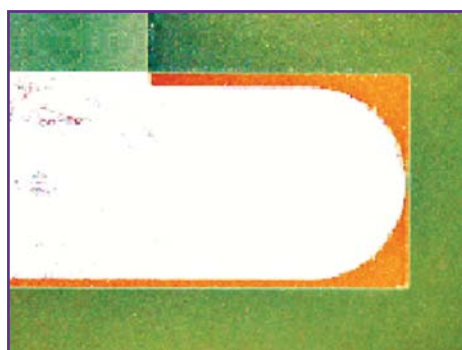


Рис. 3. Детальный снимок отверстия в паяльной маске LPI5M после 1000 циклов при $-40/+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (стабильный базовый материал при нагрузке термоциклированием)

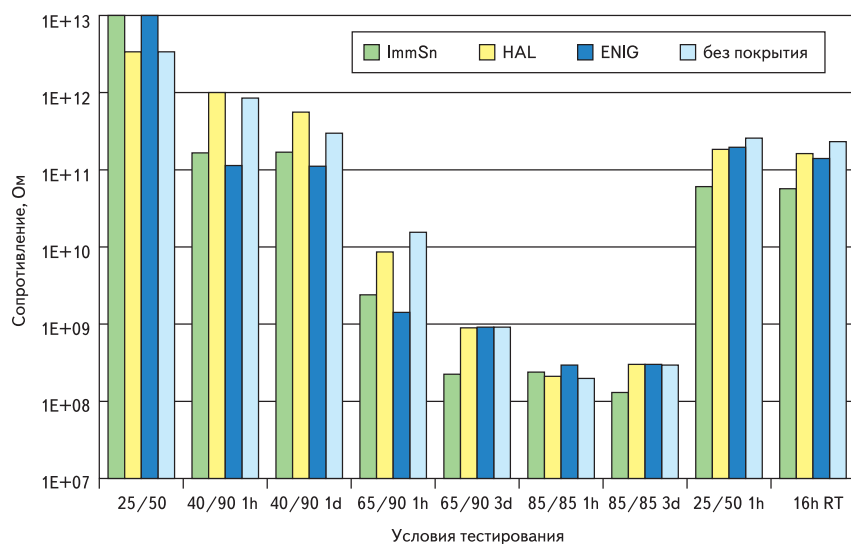


Рис. 5. Значения изоляционного сопротивления фотоструктурированной паяльной маски на различных финишных покрытиях после нагрузки термоциклированием (1000 циклов, $-40/+150\text{ }^{\circ}\text{C}$)

климатическую нагрузку, были зафиксированы значения сопротивления изоляции выше нижней границы в $100\text{ M}\Omega$. Не было установлено характерного влияния финишного покрытия ПП. Таким образом, не было зафиксировано предварительного повреждения паяльной маски и соединения между паяльной маской и медным проводником. Вариация обработки поверхности под слоем (не представлено в данной статье) также не оказывает влияния на значение изоляционного сопротивления.

Уменьшение значений изоляционного сопротивления при термоциклировании (сумма времени задержки при максимальных значениях температуры) сравнимо с уменьшением при постоянной температурной нагрузке. Как и следовало ожидать, термоциклирование не оказывает влияния на сопротивление изоляции.

Выводы

Значение термостойкости защитных и изоляционных лаков, в том числе паяльных масок, чрезвычайно важно. С одной стороны, увеличивается температура эксплуатации электронных узлов, а с другой — постоянно возрастает процентная часть температурной нагрузки за счет самонагрева вследствие значительного увеличения плотности монтажа.

Термостойкость электроизоляционных материалов может быть испытана в соответствии с нормой DIN EN 60216. Защитные лаки на основе органических полимеров можно применять (в зависимости от типа полимера) при постоянной температуре до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ или кратковременно до $165\text{ }^{\circ}\text{C}$. Если температура превышает данные значения, обязательно применение силиконовых лаков.

Проведенные исследования термостойкости паяльных масок показали, что при высокой температурной нагрузке не нарушается эксплуатационная надежность. Для исследования эксплуатационной надежности после нагрузки были подробно исследованы электрические свойства. Исследование влагостойкости и сопротивления изоляции в соответствии с ТМ 2.6.3.1 нормы IPC-TM-650 при повышенных условиях тестирования $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 85% относительной влажности и под напряжением $50\text{ V}_{\text{BIAS}}$ показало, что не происходит образования продуктов ионного расщепления и значения изоляции находятся выше, чем $10^8\text{ }\Omega$. Важная для изоляции величина тока утечки также была сохранена на хорошем уровне.

Была зафиксирована очень высокая стойкость паяльных масок при испытании термоциклированием. Были выдержаны температурные циклы $-40/+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ с «жестким» режимом (время смены температуры менее 10 с). Температурную нагрузку при термоциклировании можно сравнить с соответствующей нагрузкой постоянной температурой.

Примечание. Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen, 2006, № 4. Германия).

Литература

1. Lienemann J. Testverfahren, Qualifikation und EMV. IMTEK, Lehrstuhl für Simulation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2001.
2. Willuweit J. Lamine für die ‚grüne‘ Leiterplatte — Lamine für spezielle Anwendungen. FED Regionalgruppe Berlin 20.4.2004.
3. Hochtemperaturelektronik — Stand und Herausforderungen. VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM), November 2002.
4. Habenicht G. Kleben. Springer Verlag, 1997.
5. Ritz K. Ein Modell für das thermische Verhalten von durchkontaktierten Bohrungen. Ruwel-7. Symposium Leiterplatten-Technologie. Kleve/Niederrhein, 2004.
6. Schilpp A., Neuberger W., Fleiner B. Einflussgrößen und Lösungswege aus der Sicht der Leiterplattenhersteller. VdL/ZVEI-Panel Discussion, Erhöhte Anforderungen an die Zyklen-fähigkeit von elektronischen Baugruppen, SMT 2004.
7. Bünning K. Aspekte zur Erhöhung der Temperaturwechselbeständigkeit von Leiterplatten. PLUS, 10/2004.
8. Suppa M. Zuverlässigkeitsprüfungen und Ausfallmechanismen bei Lötstopplacken. VdL/ZVEI-Panel Discussion. Erhöhte Anforderungen an die Zyklenfähigkeit von elektronischen Baugruppen, SMT 2004.
9. Neves B. Microtek Laboratories, USA. Accelerating PTH Reliability Testing while reducing Cost. EIPC-Summer Conference. Basel, 2004.
10. DIN EN 60216. Bestimmung der thermischen Beständigkeit von Elektroisolierstoffen.
11. Bagung D., Wiesa T. Zukünftige Anforderungen an Leiterplatten für die Automobilelektronik. VdL/ZVEI-Panel Discussion. Erhöhte Anforderungen an die Zyklenfähigkeit von elektronischen Baugruppen. SMT 2004.
12. ZVEI-Schriftenreihe. Pro Technik — bleifreies Löten: Materialien, Komponenten, Prozesse. 1999.
13. Einflussgrößen und Lösungswege aus der Sicht der Leiterplattenhersteller. VdL/ZVEI-Panel Discussion. Erhöhte Anforderungen an die Zyklenfähigkeit von elektronischen Baugruppen. SMT 2004.
14. Ehrenstein G. W. Polymer-Werkstoffe. Hanser-Fachbuch, 1999.
15. Pape U., Rittner M., Liebl T., Neher N., Nowotnick M. Untersuchung der Zuverlässigkeit hochtemperaturgeeigneter Baugruppen. DVS/GMM-Fachtagung, Fellbach, 2006.
16. Scheel W., Nowotnick M., Kempe W. Innovative Produktionsprozesse für die Hochtemperatur-Elektronik am Beispiel der Kfz-Elektroniksysteme. Band 2 der Reihe: Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik — aktuelle Berichte. 1. Auflage, 2005.