

Высокотемпературные электронные модули на основе органических плат

В статье представлены и описаны специальные проблемы и решения, касающиеся плат-носителей и паяных соединений для высокотемпературных электронных модулей. При этом выявлены отчасти противоречивые требования к используемым материалам. В заключение показано, что надежный электронный модуль можно получить только при оптимизации всей системы.

Матиас Новотник
(Mathias Nowotnick),
профессор, д. т. н.

mathias.nowotnick@uni-rostock.de
Перевод: Андрей Новиков

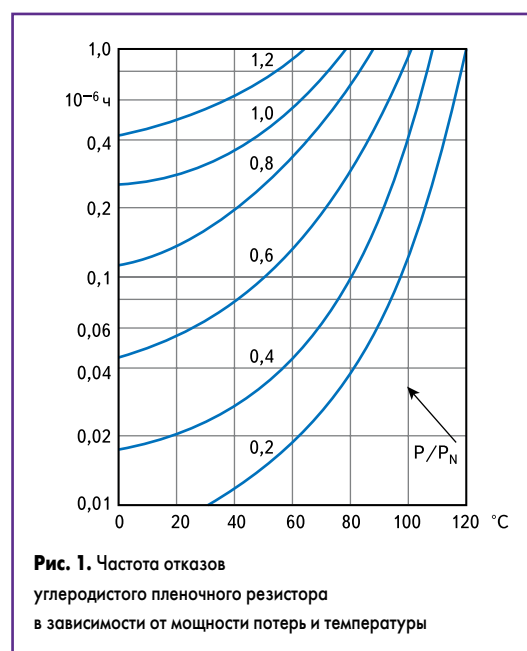
andrej.novikov@uni-rostock.de

Введение

Для электронных модулей в целом высокотемпературная область начинается при 125 °С [1]. Важность этой специальной области применения становится видна благодаря многочисленным мероприятиям и публикациям, таким, например, как актуальное руководство рабочей группы ZVEI, специализирующейся на высокотемпературной электронике: «Производство высокотемпературных электронных модулей — взаимодействия и влияния» [2] или заключительный отчет проекта Федерального Министерства образования и науки ФРГ «Инновационные процессы изготовления для высокотемпературной электроники — HotEL» [3]. В большей степени свое влияние на развитие высокотемпературной электроники оказывает ав-

томобильная промышленность, например, в области изготовления двигателей, тормозов и коробок передач. Но и в силовой и промышленной электронике возрастает потребность в электронных модулях, приспособленных к высоким температурам. Источники тепла могут находиться в окружении электронных модулей, количество тепла зависит от мощности потерь электронных компонентов. При этом повышение температуры ведет к увеличению частоты отказов, что изображено на рис. 1 на примере углеродистого пленочного резистора.

Однако именно применения высокотемпературной электроники требуют, как правило, особенно высокой надежности, что находится в противоречии с вышеназванной зависимостью. Так, считается, что срок службы электронных модулей для автомобилей составляет от 15 до 20 лет, что показывают испытания при помощи нагрузки температурными циклами от -40 до +125 °С (или 150 °С) на протяжении от 2000 до 3000 циклов. До тех пор пока повышение температуры ведет лишь к ускорению механизмов отказа, можно достаточно просто спрогнозировать результирующий срок службы электронного модуля. Если же повышенная температура вызывает другие по качеству механизмы отказа, как, например, при превышении температуры стеклования у полимеров или критической температуры рекристаллизации у металлов, становится сложно спрогнозировать их срок службы. Принципиально надежность применений высокотемпературной электроники можно улучшить двумя способами. С одной стороны, с помощью охлаждения и отвода тепла можно снизить температуру локально до поддающегося управлению уровня. Однако из-за сложности конструкций теплоотводов преимущества миниатюризации будут, по крайней мере, частично потеряны. С другой стороны, конструкции и материалы можно приспособить к высокотемпературным условиям. Второй способ будет далее рассмотрен на примере паяльных материалов и материалов печатных плат.



Паяные соединения, приспособленные к высоким температурам

Прежде всего, для мягких паяных соединений рабочие температуры высокотемпературной электроники представляют собой особую нагрузку. Так как все мягкие припои (с точкой плавления $<450\text{ }^\circ\text{C}$) даже при комнатной температуре нагреваются более чем на 40% выше их температуры плавления (гомологическая температура плавления $>0,4$) [5], ползучесть, вызванная высокой температурой, будет в значительной степени преобладать над надежностью таких паяных соединений. Согласно опыту, несмотря на это, мягкие паяные соединения электронных модулей до гомологической температуры около 0,8 могут много лет надежно функционировать. В случае с эвтектическим припоем SnAgCu это соответствует рабочей температуре примерно в $125\text{ }^\circ\text{C}$. Кроме того, в области высокотемпературной электроники применяемые сегодня стандартные мягкие припои на основе олова, как правило, не являются больше надежными. Однако припои со значительно более высокой температурой плавления нельзя использовать на органических платах-носителях и со стандартными электронными модулями, так как требуемые высокие температуры плавления будут превышать допустимые температурные пределы компонентов.

Благодаря дальнейшей разработке мягких припоев и изготавливаемых с их помощью паяных соединений сегодня стало возможным при неизменной температуре плавления увеличить температуру соединений до гомологической температуры около 0,86, за счет чего можно надежно реализовывать рабочие температуры до $150\text{ }^\circ\text{C}$ с мягкими паяными соединениями для специальных применений [6, 7]. Для этой цели часто используются так называемые реакционные припои, которые отличаются от стандартных готовых припоев. В то время как готовый сплав, что понятно уже из названия, выпускается изготовителем припои, в реакционных припоях сам сплав образуется лишь в процессе пайки. Реакционные припои состоят из двух и более (металлических) компонентов для пайки, которые в дальнейшем в процессе пайки вступают в реакцию друг с другом, что может происходить за счет диффузии твердого, жидкого и парообразного состояния. Необходимая реакция протекает в твердом состоянии, естественно, достаточно медленно, но может быть ускорена за счет того, что один из компонентов присутствует в жидкой или парообразной форме. Благодаря этому возможно обрабатывать реакционные припои даже при привычной продолжительности монтажа электронных модулей. Различные компоненты изготавливаются преимущественно в форме слоев или порошковой смеси. Особенно для пайки оплавлением с паяльными пастами предоставляется возможность смешивать порошки с флюсами. Подробно такого рода реакционные припои были описаны в статье «Реакционные припои в электронике» [8], двумя типичными (запатентованными) типами припоев яв-

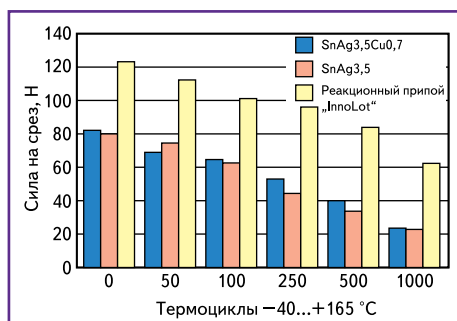


Рис. 2. Сравнение результатов испытаний на срез чип-резисторов формы 1206 после нагрузки температурными циклами $-40...+165\text{ }^\circ\text{C}$, припаянных стандартными припоями SnAgCu, SnAg и реакционным припоем InnoLot

ляются четырехкомпонентная система RKL (DE19728014/1999), а также шестикомпонентная система InnoLot (DE10319888/2003).

За пределами описанных температурных границ в $150\text{ }^\circ\text{C}$ эти реакционные припои в отдельных случаях можно было также успешно протестировать и при более высоких температурах. Так, реакционный припой RKL для автомобильной электроники был испытан даже при рабочей температуре до $160\text{ }^\circ\text{C}$ [6]. Реакционный припой InnoLot был протестирован в рамках проекта «HotEL» [3] в сравнении со стандартными припоями, при этом были достигнуты значения температуры испытания до $165\text{ }^\circ\text{C}$. Однако при таких высоких температурах спектр имеющихся в распоряжении электронных компонентов сильно ограничен. На рис. 2 изображены результаты проекта относительно прочности на срез при изменении температуры.

Паяные соединения, изготовленные с реакционным припоем, демонстрируют уже в исходном состоянии на 50% более высокую прочность, чем соединения, изготовленные с припоями SnAgCu или SnAg. Хотя после 1000 температурных циклов $40...+165\text{ }^\circ\text{C}$ силы на срез уменьшаются и в соединениях, изготовленных с реакционным припоем, они все еще составляют более 50% исходного значения и в три раза превышают значения соединений со стандартными припоями.

Также в ходе исследований в рамках проекта «HotEL» стала очевидна принципиальная проблема, состоящая в том, что повышение стабильности паяных соединений привело во многих случаях к выходу из строя других компонентов. Так как причина повреждений — в различных термических коэффициентах расширения электронных компонентов и органических плат-носителей, механические напряжения неизбежны. В то время как мягкое и гибкое паяное соединение снижает данную нагрузку за счет пластической деформации (ползучести), в более твердых соединениях с реакционным припоем и меньшей степенью деформации данная нагрузка оказывает более долгое воздействие на печатные платы и электронные компоненты. Вследствие чего могут образовываться трещины, например, на медных проводниках, как показано на рис. 3. Здесь трещина возникла исключительно при термомеханической нагрузке при смене



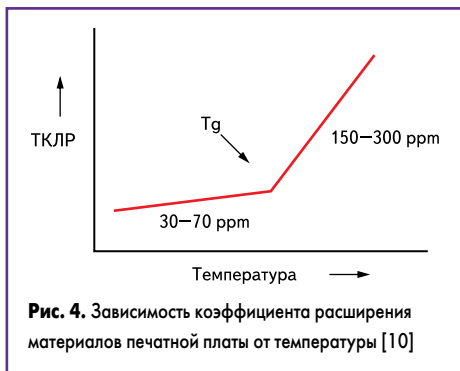
Рис. 3. Трещины в материале печатной платы могут привести к надлому медного проводника из-за локальных механических напряжений [3]

температур $40...+165\text{ }^\circ\text{C}$ без дополнительных механических влияний.

Высокая прочность паяного соединения, изготовленного при помощи реакционного припоя InnoLot, привела в данном случае к концентрации механических напряжений на краю контактной площадки и/или на переходе к проводнику. В рамках проекта «HotEL» данная зависимость была также подтверждена при помощи моделирования методом конечных элементов. Воздействие напряжений при растяжении обнаруживается на относительном сужении меди непосредственно рядом с трещиной. Пластичность меди и расположение стекловолна в FR4 играют важную роль. Так как надежное паяное соединение имеет смысл лишь тогда, когда основные материалы и субстрат выполняют одинаковые минимальные требования, органическая плата-носитель имеет особое значение при использовании ее в высокотемпературной электронике.

Платы, приспособленные к высоким температурам

Надежность материала субстрата, конечно, можно повысить, например, при помощи более толстых слоев меди или металлизированных отверстий в печатной плате с большим диаметром. Возможно также при помощи увеличения содержания наполнителя в эпоксидной смоле уменьшить термическое расширение и таким образом улучшить стабильность циклов. Однако подобное изменение содержания наполнителя имеет свои границы, так как одновременно с ним понижается адгезия меди [10]. Известно, что более тонкие субстраты при одинаковом расширении по оси Z вызывают меньшую нагрузку, прежде всего на металлизированных отверстиях. Толщина нитей стекловолна тоже оказывает влияние на механические свойства. Более тонкие волокна, прежде всего, уменьшают расширение по оси Z и улучшают стабильность размеров. Спектр доступных сегодня стекловолн для материалов печатных плат начинается от типа ткани 7629 с толщиной нити 9 мкм и 17 нитями на см и заканчивается типом ткани 104 с толщиной нити 5 мкм и 24 нитями на см. Для высокотемпературного использования более предпочтительны толстые стекловолна, с их помощью можно уменьшить расширение по оси Z и улучшить стабильность размеров [10].



Правда, данная тенденция противоречит требованию технологий малого шага (Fine-Pitch) и высокой плотности монтажа (High Density Interconnect, HDI).

Верхняя граница предельно допустимой температурной нагрузки материала субстрата, как известно, вычисляется из температуры стеклования T_g . Хотя не только быстро уменьшающаяся механическая стабильность из-за размягчения материала препятствует долгой эксплуатации выше температуры T_g . Прежде всего, бóльший коэффициент расширения увеличивает рассогласование всех других материалов, которые находятся в непосредственной связи с субстратом. На рис. 4 схематически изображено скачкообразное увеличение коэффициента расширения в связи с увеличением температуры [10].

Долговременное превышение допустимой рабочей температуры служит причиной окислительного разложения материалов субстрата, которое выражается в снижении веса. Снижение более чем на 5% приводит к повреждению, при котором материал становится хрупким, это может привести к образованию трещин [10]. Таким образом, для электронного модуля температура стеклования органической платы-носителя должна быть значительно выше рабочей температуры.

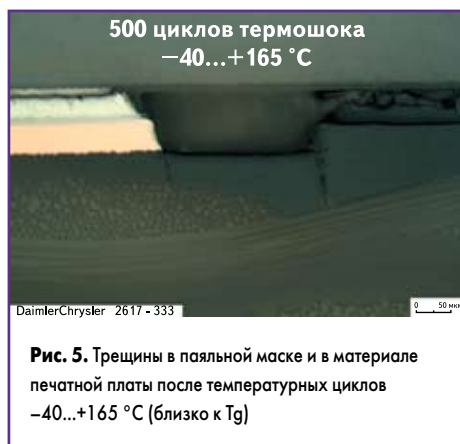
Эпоксидные смолы, которые используются в стандартном материале FR4, обладают рядом более выгодных электрических и химических свойств. Значение T_g можно варьировать в определенных пределах за счет способа затвердевания (аминное/фенольное). Сейчас для субстратов печатных плат доступны значения T_g между 125 и 180 °С. Правда, и ниже T_g необходимо учитывать все еще достаточно высокий коэффициент расширения, который может составлять по осям X-Y 17 ppm/K и по оси Z для стандартного материала FR4 — до 70 ppm/K. У субстратов FR4 с высоким значением T_g коэффициент расширения по оси Z может достигать 110 ppm/K [11].

Похожие проблемы обнаруживаются и у других материалов с высоким значением T_g , таких, например, как бисмалеимид-триазиновая смола (BT). С температурой стеклования до 200 °С она подходит и для высокотемпературных электронных модулей. Но из-за коэффициентов расширения от 30–40 ppm/K по осям X-Y и 100 ppm/K по оси Z здесь есть ограничения, по крайней мере, для электронных модулей с большими компонентами. Более выгодными считаются полиимидные субстраты, значение T_g которых достигает

260 °С, в связи с чем их можно применять при намного более высоких рабочих температурах. Для полиимида, уплотненного стекловолокном, можно достичь похожих коэффициентов расширения, как и для FR4: около 17 ppm/K по осям X-Y и 100 ppm/K по оси Z [11]. Кроме того, полиимид может быть произведен в виде эластичной пленки толщиной 0,1 мм, что может еще более упростить проблему коэффициента расширения.

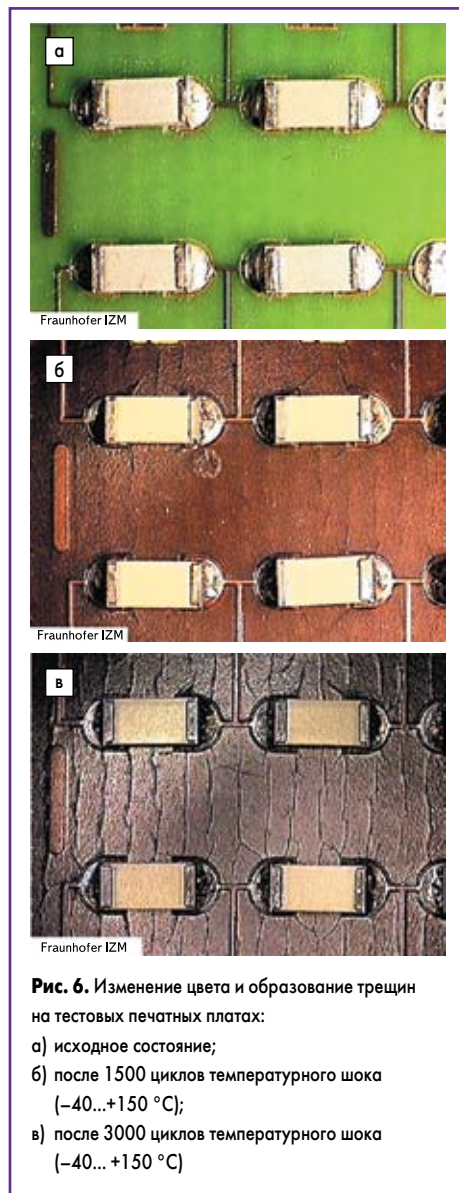
Более того, существует еще ряд других материалов с высоким значением T_g [10], таких как цианат-эфир (CE) с T_g от 250 °С и коэффициентом расширения от 70 ppm/K, политетрафторэтилен (тефлон/ПТФЭ) с T_g 230 °С и коэффициентом расширения от 70 ppm/K или так называемые жидкокристаллические полимеры (ЖКП) с T_g 280 °С и коэффициентом расширения 105 ppm/K. Но не считая высокой стоимости, переработка некоторых из этих материалов вызывает проблемы, так, например, слои меди имеют плохую адгезию на лаке из ПТФЭ. Наибольший потенциал представляет материал ЖКП, свойства которого могут быть модифицированы с помощью керамического наполнителя (например, RO40003). Наряду с очень хорошими СВЧ-характеристиками ЖКП его коэффициент расширения по оси Z может быть снижен до 45 ppm/K [10].

Приспособление органических плат-носителей к высоким рабочим температурам касается не только основного материала, но и покрытия, например паяльной маски. На исследуемых платах-носителях в рамках проекта “HotEL”, несмотря на использование базисных материалов с высокой T_g , были обнаружены трещины на внешней поверхности, которые сначала появились на паяльной маске и оттуда распространились на субстрат. На рис. 5 изображен типичный характер расположения трещин уже после 500 температурных циклов $-40...+165$ °С [3].



Изменение материалов видно и в изменении цвета печатных плат, которое, прежде всего, объясняется наличием паяльной маски. На рис. 6 хорошо видна эта зависимость. На основании изменений цвета в рамках проекта “HotEL” была разработана цветовая шкала, которая позволила однозначно соотносить состояние старения с цветом [12].

Альтернативно с органическими платами в качестве субстрата могут использоваться



и неорганические материалы, такие как керамика, которые могут быть намного лучше термически и термомеханически адаптированы к электронным модулям. Однако их стоимость и сложность их переработки являются причинами того, что производители предпочитают использовать органические платы вплоть до исчерпания их возможностей. При этом свойства органических субстратов улучшаются и оптимизируются за счет их комбинации с неорганическими материалами. Наряду с обычными наполнителями и тканевыми материалами также возможно совмещать неорганические носители (внутренние слои) с органической фольгой.

Металлические внутренние слои используются, главным образом, для улучшения теплопроводности в силовой электронике. Здесь, прежде всего, естественно, применяются алюминиевые сплавы и медь из-за их отличной теплопроводности (225 и/или 390 Вт/м·К). В случае с материалами, обозначенными как изолированный металлический субстрат (Insulated Metal Substrates, IMS), металлический внутренний слой толщиной в 1–2 мм определяет в большой степени коэффициент расширения всей системы. Для лучшего термического контактирования изоляционные

слои толщиной в 50–75 мкм стараются сохранять как можно более тонкими [13]. Однако эти материалы с коэффициентом расширения 25 ppm/K (алюминий) и 17 ppm/K (медь) все еще обладают значительным термомеханическим рассогласованием с керамическими электронными модулями, расширение которых составляет от 4–8 ppm/K.

Гораздо более подходящим термомеханическим согласованием обладают специальные сплавы, такие как инвар, сплав железа и никеля (FeNi36). Инвар обладает очень маленьким коэффициентом расширения — 1,4 ppm/K, правда, и относительно плохой теплопроводностью — лишь 13 Вт/м·К. Для получения оптимальных характеристик системы этот металл может быть покрыт слоем меди с обеих сторон для получения желаемого коэффициента расширения подобной комбинации. Результирующий коэффициент для этой структуры-сэндвича может быть высчитан следующим образом [4]:

$$\alpha_{ges} = \frac{\alpha_1 E_1 h_1 + \alpha_2 E_2 h_2}{E_1 h_1 + E_2 h_2},$$

где α — коэффициент расширения; E — модуль упругости; h — толщина материала. На рис. 7 показан график зависимости коэффициента теплового расширения инвара с металлическими внутренними слоями из молибдена от толщины медного слоя [4].

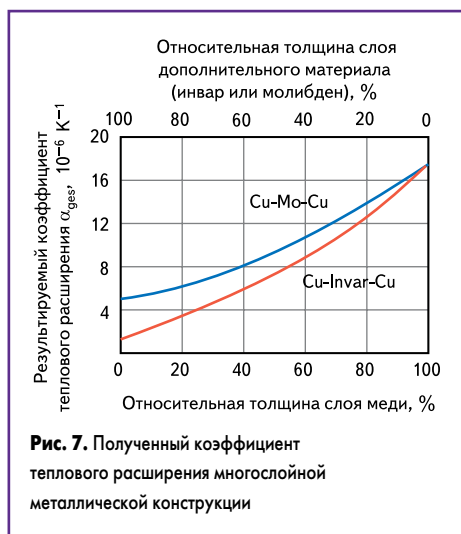


Рис. 7. Полученный коэффициент теплового расширения многослойной металлической конструкции

Обычная многослойная структура состоит из 20% меди, 60% инвара и еще 20% меди. Таким образом, можно получить коэффициент расширения 6 ppm/K. Но также принципиально возможно в качестве внутренних слоев интегрировать в многослойную печатную плату стеклянную фольгу, которая имеет подходящий коэффициент расширения — 6–7 ppm/K [14].

Другие решения и перспективы

Описанные выше варианты представляют собой различные решения того, как адаптировать характеристики соединений и материалов субстратов к требованиям высокотемпературной электроники. В определенных случаях возможным надежным решением является последовательное согласование всей системы

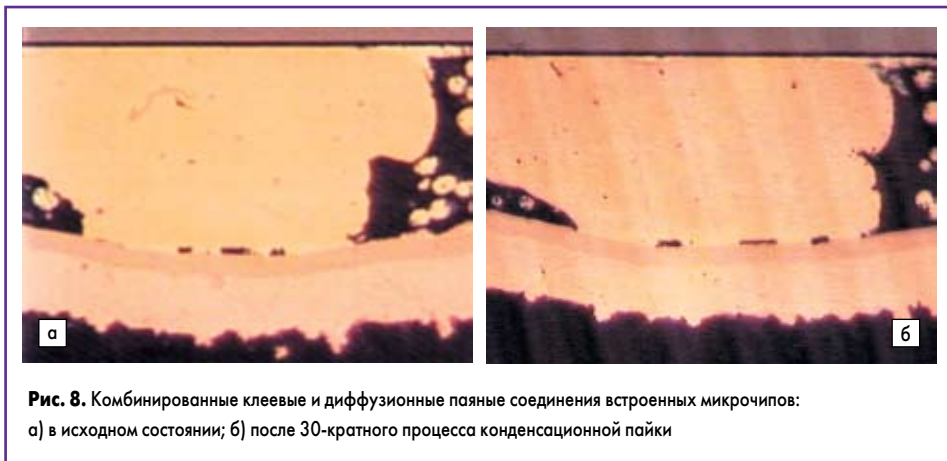


Рис. 8. Комбинированные клеевые и диффузионные паяные соединения встроенных микрочипов: а) в исходном состоянии; б) после 30-кратного процесса конденсационной пайки

целиком. Это может быть реализовано за счет интегрированных систем, которые первоначально не были разработаны для высокотемпературной электроники. Так, испытания на грузкой интегрированных компонентов по технологии перевернутого кристалла (Flip-Chip) с монтажом в углубление, созданное лазером (Lasercavity) [15], показали удивительную предельно допустимую температурную нагрузку. Интегрированные в материал печатной платы чипы при этом как приклеиваются при помощи анизотропного электропроводящего клея, так и припаиваются. Включенные в клей паяные частицы образуют вместе с золотыми шариковыми контактами и внутренним слоем печатной платы под давлением и температурой диффузное паяное соединение. Это комбинированное клеевое и паяное соединение подвергли неоднократным циклам пайки, для того чтобы протестировать дальнейшую обработку субстратов в последующем процессе поверхностного монтажа. На рис. 8 изображены отдельные соединения до и после испытания.

Изначально целью данных испытаний было проведение теста конца срока службы (End-of-Life, EOL) для многократных процессов пайки. Однако после 30 циклов пайки в паровой фазе при резком повышении температуры до 230 °C испытание было приостановлено. С помощью тестовых структур Daisy-Chain невозможно было зафиксировать никаких электрических изменений, и последующий металлографический анализ подтвердил целостность диффузионных паяных соединений [15].

Комбинированный концепт клево-паяных соединений был также разработан специально для высокотемпературной электроники. В отличие от очевидно высокоплавких диффузионных паяных соединений в приведенном выше примере, в рамках проекта “Temporary Liquid Solder Design, TLSD” [16] была разработана и протестирована возможность комбинирования жидких паяных соединений с устойчивыми к высоким температурам клеевыми соединениями. Механическая стабильность этих комбинированных соединений обеспечивается, главным образом, за счет опорного материала, клеювого соединения. Припой, напротив, отвечает за электрическую и термическую проводимость соединения. Так как этот припой включен в опорный материал, допустимо, чтобы паяные соединения во время их рабочего использования при 200...250 °C становились

жидкими. В принципе с самого начала в данном случае можно было использовать жидкие металлы, такие, например, как ртуть. Такого рода токсические тяжелые металлы, конечно, не могут быть использованы для электронных модулей, вместо этого в выше названном проекте был использован легкоплавкий сплав BiSn с температурой перехода в твердое состояние 138 °C, который при эксплуатации высокотемпературного паяного соединения выше 150 °C наверняка станет жидким. Таким образом, без проблем могут быть уравновешены различные коэффициенты расширения соединенных электронных компонентов. Трещины автоматически исчезают при каждом оплавлении. В качестве тестовых образцов в данном проекте были использованы как корпуса специальных силовых электронных компонентов, так и соединения для поверхностного монтажа на полиимидных платах-носителях.

В целом идея систем и комбинирования различных соединений [17] является многообещающим решением в разработке продуктов для особо высоких рабочих температур с высокими требованиями к надежности. Разработка и оптимизация целой системы, конечно, все еще остается сложной задачей для конструкторов, изготовителей электронных компонентов, плат-носителей и материалов.

Примечание. Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen. 2009. № 9. Германия).

Литература

1. AEA Technology: The World Market for High Temperature Electronics. A HITEN Report, Harwell 1997.
2. Leitfaden des ZVEI-Arbeitskreises Hochtemperaturrelektronik. Fertigung von Hochtemperatur-Baugruppen — Wechselwirkungen und Einflussgrößen, 2009.
3. Nowotnick M., Pape U., Neher W. Bewertung der Ergebnisse und Simulation der Zuverlässigkeit / Aufbau und Verbindungstechnik in der Elektronik — aktuelle Berichte. Band 2. Innovative Produktionsprozesse für die Hochtemperatur-Elektronik am Beispiel der KFZ-Elektroniksysteme. Templin, 2005.
4. Krause W. Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik, 3. München: Auflage, Carl Hanser Verlag, 2000.

5. Müller W.; Müller J.-U. Löttechnik — Leitfaden für die Praxis, Fachbuchreihe Schweißtechnik. Band 127. Düsseldorf: DVS-Verlag GmbH, 1995.
6. Härtel W. Reaktionslote und andere Pastensysteme, Firmenschrift, Wolfgang Härtel Speziallotpaste. Freiberg, 2007.
7. Nowotnick M., Petzold G., Wilke K. Arbeitsergebnisse zur technischen Zuverlässigkeit der Projektlösungen, Statusseminar: Systemlösung für die Anwendung von innovativen Weichloten für hochbeanspruchte Elektronikbaugruppen, BMBF-Projekt InnoLot, Jülich 07.03.2003.
8. Nowotnick M., Härtel W., Wittke K., Detert M. Reaktionslote in der Elektronik — Erfahrungen und Potentiale, Fachzeitschrift PLUS Heft 4/2008, Leuze Verlag.
9. Nowotnick M., Pape U. Ergebnisse der Zuverlässigkeitsuntersuchungen, 12. Workshop Mikrotechnische Produktion, Zuverlässigkeit von HDI — und Hochtemperatur-Baugruppen. Dresden. 28.04.2004.
10. Steffen H. Hochtemperaturgeeignete organische Schaltungsträger / Aufbau und Verbindungstechnik in der Elektronik aktuelle Berichte. Band 2. Innovative Produktionsprozesse für die Hochtemperatur-Elektronik am Beispiel der KFZ-Elektroniksysteme. Verlag Dr. M. Detert, Templin, 2005.
11. Wilde J. u. a. Hochtemperatur-Elektronik — Stand und Herausforderungen. VDE/GMM. Frankfurt am Main. November 2002.
12. Pape U., Nowotnick M., Rittner M., Neher W., Stephan J. Zuverlässigkeitsuntersuchungen der Aufbautechnik / Aufbau und Verbindungstechnik in der Elektronik aktuelle Berichte. Band 2. Innovative Produktionsprozesse für die Hochtemperatur-Elektronik am Beispiel der KFZ-Elektroniksysteme. Verlag Dr. M. Detert. Templin, 2005.
13. Asetronics AG, Bern, Switzerland. Insulated Metal Substrate Datasheet — AS1002 Multilayer www.precel.com, 2004.
14. Scheel W., Krabe D., Cygon M., Dietz M. Mehrschichtleiterplatte. EP1240809. 11 Juni 2003.
15. Schönholz R., Nowotnick M., Novikov A. Laser Structured Printed Circuit Boards — Application and Characteristics // IMAPS International Conference on Device Packaging. Scottsdale. 10–12 März 2009.
16. Scheel W., Wittke K., Nowotnick M. Innovative Bauweisen von elektronischen Baugruppen mit flüssigen Lötverbindungen für den Temperaturbereich bis 250 °C; Buchreihe: Aufbau — und Verbindungstechnik in der Elektronik — aktuelle Berichte. Band 1. Templin: Verlag Dr. Markus A. Detert, 2004.
17. Wittke K., Füssel U. Kombinierte Fügeverbindungen., Berlin: Springer Verlag, 1996.