

Повышение надежности за счет миниатюризации?

Некоторые результаты проекта LiVe (Limitierte Verbindungen – лимитированные соединения).

Часть 1. Постановка цели и методы решения

Представленная статья содержит выборочные результаты проекта «Модификация материала для конструкций соединений с ограничением размеров и материала в электронных модулях с высокой степенью интеграции», финансируемого Немецким Министерством Образования и Науки (Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF). Сокращенное название проекта – LiVe (Limitierte Verbindungen – лимитированные соединения).

Уве Папе (Uwe Pape)

Uwe.Pape@volkswagen.de

Ганс-Юрген Альбрехт (Hans-Jürgen Albrecht), профессор, д. т. н.

Перевод: Андрей Новиков

andrej.novikov@uni-rostock.de

В данной статье представлены материалы докладов в несколько сжатой форме, прочитанных на консультационном семинаре в рамках выставки SMT/Hybrid & Packaging 2008. Доклады разделены в соответствии с 4 основными задачами проекта:

- Часть 1. Постановка цели и методы решения.
- Часть 2. Результаты исследований с различными методами измерений.
- Часть 3. Металлургические взаимодействия и их проявления.
- Часть 4. Прогнозирование долговечности на основании результатов экспериментов и моделирования.

В первой части, представленной в этой статье, описаны постановка цели и итоговая матрица решений в проекте LiVe, а также методика обработки результатов проекта. Особенно это касается исследования припоев и паяных соединений, вариации методов тестирования и выбора тестовых модулей.

Постановка цели и матрица решений в проекте LiVe

Дальнейшее уменьшение материального объема соединений определяется миниатюризацией конечных продуктов и уменьшением электронных компонентов. Припой SnPb, применяемый долгое время в качестве стандартного, в полной мере соответствовал требованиям по отношению к конечным продуктам при повышении влияния качества граничащих поверхностей. Исключение в данном случае составляли такие области применения, как мобильная и высокотемпературная электроника, для кото-

рых необходимы новые решения для стабилизации рабочих характеристик при непосредственном переходе на бессвинцовые припои и, следовательно, расширении и/или предъявлении абсолютно новых требований к материалу в технологиях монтажа и соединения (рис. 1).

Накопленный на данный момент опыт в области бессвинцовых паяльных материалов позволяет предположить, что настоящие и будущие повышенные требования к технической и производственной надежности могут быть выполнены лишь условно. Конкретные динамические параметры нагрузки материалов соединений либо неизвестны, либо могут быть определены с большим трудом, несмотря на дальнейшее повышение параметров нагрузки модулей промышленной электроники. Исходя из этих граничных условий создается необходимость характеристики и нацеленной модификации миниатюрных паяных соединений из бессвинцовых припоев. При этом эффективная модификация материалов напрямую на электронном модуле (так называемая on-board, или inline-модификация) может быть обеспечена с помощью вызванных в процессе соединения реакций легирования и выделения и связанных с ними дальнейших реакций на пограничных поверхностях в виде образования и распределения интерметаллических фаз (ИМФ). Эта модификация должна быть направлена на повышение усталостной прочности бессвинцовых припоев, которая зависит от определенного применения.

Цель данного проекта заключается в модификации материала и/или в разработке технологии повышения качества для использования в компонентах с минимальным расстоянием между контактами



в комбинации с присадочными материалами, которые с точки зрения надежности описаны недостаточно полно (рис. 2). Исследования были нацелены в первую очередь на повышение качества припоев для микросоединений за счет контролируемого легирования в процессе присоединения и создание технологических условий процесса для оптимальной концентрации и распределения дополнительного (облагораживающего) материала в миниатюрных паяных соединениях электронных компонентов с шагом менее 0,5 мм. Соединения с улучшенным подобным образом объемом должны выдерживать температуры эксплуатации $T \geq 150^\circ\text{C}$. А также необходимо обеспечить термомеханическую прочность бессвинцовых паяных соединений в температурном интервале от -40 до $+150^\circ\text{C}$ в течение как минимум 1000 циклов.

Результаты, представленные в данной статье, базируются на исследованиях тестовых модулей с разными припоями (SnAgCu с различным содержанием Ag и Cu, а также с добавками Ni и P для изменения свойств граничных поверхностей) на тех или иных финишных поверхностях печатных плат (рис. 3). Применение большого количества разнообразных компонентов с большим и очень маленьким шагом и размерами — вплоть до чип-резисторов 01005 — позволяет оценить различия в материалах и конструкциях.

Для описания параметров старения были выбраны ускоренные и комбинированные методы тестирования, которые помогают генерировать обширную картину ожидаемых признаков повреждения. Все исследования проводились в сравнении со стандартным до недавнего времени припоем SnPb. Выбор испытаний термошоком и термоциклированием был использован для того, чтобы выяснить, необходимо ли согласование методов испытания в соответствии с признаками усталости бессвинцовых припоев с помощью полученных результатов. Решения с использованием данных результатов должны дать основания для описания факторов ускорения и призна-

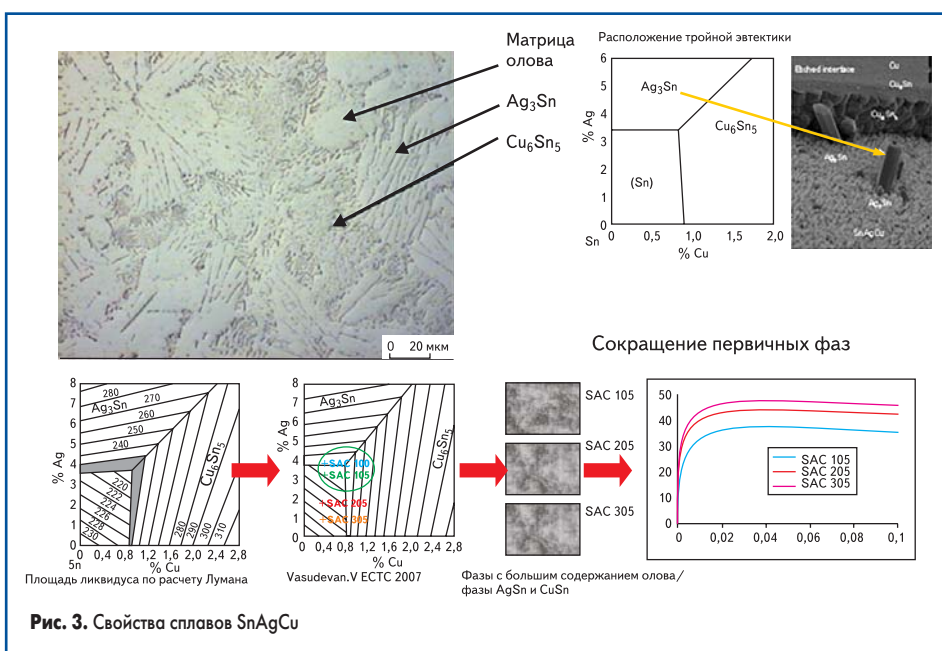
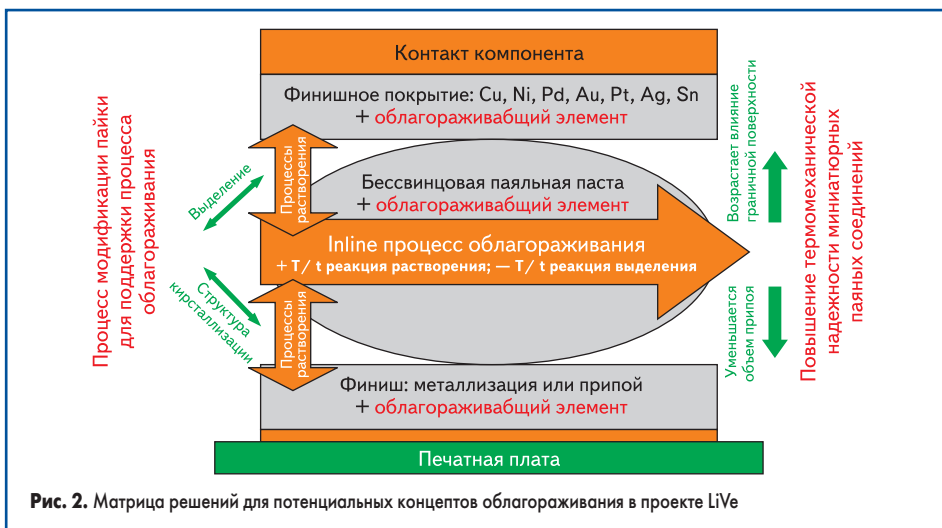
ков долговечности, которые имеют особое значение при введении новых продуктов. В дополнение к этому были разработаны и применены комбинированные методы тестирования

для автомобильной электроники с целью нахождения решения в области пересечения нагрузки с методом ускоренного испытания старения ТСТ.

Результаты описывают возможности различных методов оценки: электрических, механических (силы при напряжении на срез и характер разрушения), а также металлографических (механизмы повреждения, идентификация характеристик граничных областей, структуры, инициализация и рост трещин).

Комбинация отдельных методов оценки и численного моделирования позволяет сделать выводы о возможной характеристике долговечности этих электронных модулей.

С помощью термомеханического описания динамических реальных нагрузок за счет испытания в условиях, близких к условиям реальной эксплуатации, или за счет измерений соответствующими сенсорами в процессе эксплуатации могут быть получены дополнительные данные, которые помогают вычислить факторы ускорения при сопоставлении с быстрыми температурными циклами, что особенно важно для сопоставления данных, полученных в ходе испытания, с реальными условиями эксплуатации.



Методы испытания для оценки на уровне электронного модуля

Практически законченный переход на бессвинцовые припои в технологии монтажа и соединений электронных модулей требует концептуальных решений для определения совместимости материалов соединений при учете требований заказчика. Однако в общем случае предпочтительный состав припоев SnAgCu не унифицирован и зависит от предварительного опыта, возможности обработки в комбинации с применяемыми компонентами, экспериментальной базы, результатов тестирования и требований заказчика. Опыт разных пользователей показал, что уже небольшие отклонения относительно состава припоя могут привести к большим различиям в качестве паяных соединений и в итоге — уровне надежности электронных модулей.

В связи с этим в проекте LiVe были поставлены высокие цели — для испытания максимально широкого спектра применяемых на данный момент припоев для изготовления миниатюрных соединений и для охвата дальнейших шагов оптимизации или возможных ограничений. При этом совместимость электронных модулей с учетом реальных условий эксплуатации при изменении материала соединения или при введении нового материала соединения с учетом возможного расширения максимальных характеристик нагрузки — одно из минимальных ключевых условий. Для реализации этих целей необходимо применять методы инспекции и тестирования, которые, базируясь на традиционных методах тестирования, описывают однозначность результатов ускоренного старения, выявляют причинную связь между данными инспекции, тестирования и рабочими характеристиками и тем самым делают возможными критерии приемки с возросшими сегодня требованиями при новом определении дополнительных материалов. Результаты тестирования возможности применения бессвинцовых припоев могут быть принципиально разделены на две группы: описание надежности процесса и полученная в результате техническая надежность. Необходимые для этого алгоритмы инспекции, результаты и критерии были проанализированы при применении бессвинцовых припоев, а затем было проведено сравнение с традиционными данными для свинецсодержащих припоев.

Методы и цели исследования данного проекта с технологической точки зрения можно обобщенно сформулировать следующим образом:

- Исследование возможности обработки припоев относительно способности смачивания, поведения при плавлении на тестовой печатной плате.
- Квалификация паяльных паст, припоев для пайки волной, трубчатых припоев.
- Анализ возможной температурной нагрузки компонентов и печатных плат при повышенных требованиях.
- Исследование прочности бессвинцовых смесей материалов для выполнения минималь-

ных требований к механическим характеристикам паяных соединений.

- Металлографические исследования паяных соединений с целью классификации признаков соединений в зависимости от финишных покрытий компонентов и печатных плат для пайки.
- Описание требований к доэвтектическим, эвтектическим и надэвтектическим бессвинцовым припоям с учетом основных тенденций и требований к надежности электронных продуктов при условиях реальной эксплуатации.

Исследование паяльных материалов и паяных соединений

Существуют разные возможности для описания паяльных материалов и паяных соединений. Для достижения целей, поставленных в этом проекте, необходимо было провести:

- Исследование влияния содержания серебра и меди в припоях SnAgCu.
- Определение влияния дополнительных (облагораживающих) элементов сплава на припой, а также на паяное соединение и образование фаз.
- Исследование процесса пайки на предмет образования соединения.
- Определение механических свойств паяльных материалов.
- Сопутствующее моделирование экспериментов с помощью моделей конечных элементов для оценки долговечности.

Влияние составляющих элементов сплава Ag и Cu

Наиболее часто применяемые сейчас варианты сплавов серии SnAgCu имеют различные доли элементов Ag и Cu, вследствие чего изменяется температура плавления. Содержание серебра варьируется между 2% и 4% по массе, а содержание меди — от 0,2% и 1,2% по массе. Поэтому на фазовой диаграмме SnAgCu сплавы расположены в области с большим содержанием олова (рис. 4).

Эвтектический тройной сплав с температурой плавления примерно 217 °С содержит около 3,5 весовых процентов серебра и 0,9 весовых процентов меди и в равновесном состоянии включает β-олово и фазы Ag₃Sn и Cu₆Sn₅.

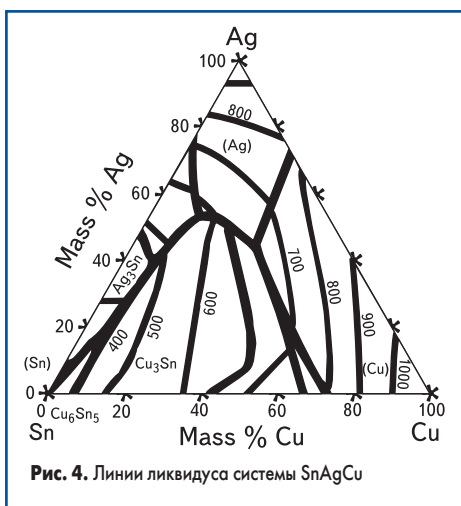


Рис. 4. Линии ликвидуса системы SnAgCu

Структура паяного соединения из этого тройного эвтектического сплава после отверждения состоит из нескольких дендритов олова, между разветвлениями которых расположены небольшие фазы Ag₃Sn и Cu₆Sn₅ и β-олово, которые отверждаются в последнюю очередь.

В надэвтектических сплавах образуются либо первичные пластинки фазы Ag₃Sn, либо коллонообразные фазы Cu₆Sn₅, которые снижают прочность и сопротивляемость ползучести. Рост больших первичных интерметаллических фаз (ИМФ) может быть подавлен кинетически с помощью быстрого охлаждения и термодинамически за счет сокращения содержания серебра и/или меди. За счет быстрого охлаждения также уменьшается дендритная структура, так как возрастает температурный градиент фронта отверждения. Отвержденные в последнюю очередь фазы между разветвлениями дендритов имеют более мелкую структуру. Обратный эффект наблюдается при более медленном охлаждении. Это означает, что структура сплава SnAgCu может быть напрямую изменена за счет вариации содержания серебра и меди, а также за счет изменения скорости охлаждения. Мелкозернистая структура ведет к более высокой прочности и более высокому сопротивлению ползучести, так как повышение прочности определяется в основном хорошим распределением ИМФ в объеме соединения.

Влияние облагораживающих элементов сплава

Количество различных контактирующих во время процесса соединения материалов может быть очень высоко. На печатной плате, как правило, с одним финишным покрытием расположены компоненты, которые отличаются многообразием металлизации контактов. Поэтому материалам, подверженным взаимодействию и поэтому зависящим от металлургических условий (таких как пограничные области, структура, ИМФ и т. д.), должно быть уделено повышенное внимание с целью увеличения термомеханической надежности, особенно в миниатюрных паяных соединениях. В связи с различными локальными температурами, вызванными разными термическими массами (различные максимальные температуры, время над точкой ликвидуса и градиенты охлаждения), взаимодействие металлов изменяется также локально. В рамках проекта было проведено обширное исследование для того, чтобы выяснить, какой результат можно ожидать от определенных элементов с целенаправленным легированием. В таблице показано влияние возможных элементов на нескольких примерах и представлены механические свойства сплавов с их содержанием.

Механические свойства паяльных материалов и паяных соединений

В рамках проекта были определены различные механические свойства исследованных сплавов SnAgCu и наиболее важных ИМФ с целью разработки базы данных для оптимизации паяльного материала SnAgCu и для про-

Таблица. Влияние облагораживающих легирующих присадок

Элемент	Bi	Zn	Ce/La	Co	Ni	Fe	Mn	Ti
Мелкозернистость	x		x	X	x	(x)	xxx	xx
Зародыши для образования ИМФ			x	X		(x)		
Поддержка фазы Cu_6Sn_5						x	X	x
Многоэлементные ИМФ				X	x	x	x	x
Уменьшение областей между дендритами			x			x		
Снижение точки плавления	x							
Механические свойства								
Уменьшение адгезии		x						
Повышение сопротивления ползучести			x		x			
Повышение прочности	(x)			X	x	x	x	x
Повышение продольной деформации					x			

ведения термомеханического моделирования, а именно:

- модуль упругости;
- предел текучести;
- предел прочности при растяжении;
- предельное удлинение;
- твердость (микро- и нанотвердость);
- ползучесть сплавов и паяных соединений.

Так как образуемые в мениске и зазоре паяного соединения структуры значительно отличаются по содержанию ИМФ, должны быть определены механические свойства как в структуре мениска (преимущественно структура припоя с первичными выделениями), так и в структуре зазора (преимущественно ИМФ) паяного соединения. В связи с этим были изготовлены специальные тестовые образцы или образцовые паяные соединения, не только для испытания на растяжение, но и для испытания на ползучесть. Для измерения твердости (также преимущественно ИМФ) могли быть без проблем использованы образцы тестовых печатных узлов.

Метод конечных элементов как вспомогательное средство для прогнозирования долговечности

Применение метода конечных элементов позволяет осуществить расчет степени повреждения паяного соединения. В зависимости от уровня нагрузки устанавливается определенная пластическая деформация паяного соединения. Рассчитанное пластическое удлинение или превращенная энергия деформации за каждый температурный цикл представляют собой, например, увеличение повреждения.

Оценка долговечности может быть проведена при наличии усталостной модели. Эта модель описывает функциональную связь между элементом повреждения и механическим отказом. Параметр механического отказа при термомеханической нагрузке — количество температурных циклов NA, после которых с определенной вероятностью происходит отказ паяного соединения. Для оценки долговечности паяльных материалов широкое распространение получили вариации эмпирического степенного математического выражения согласно Коффи-ну и Мэнсону.

Составление эмпирической функции происходит на основании ускоренных испытаний.

Для каждого сплава припоя необходимо проведение отдельных экспериментов. Для этого должны быть известны механизмы повреждения в припое, а также вызывающая их нагрузка. В паяльном материале пластическая деформация, вызванная термически инициированными напряжениями, ведет к возникновению дефектов, которые, в свою очередь, ведут к механическому отказу.

Для ускорения повреждения паяные соединения подвергаются большей нагрузке по сравнению с обычными условиями эксплуатации. При этом необходимо исключить возможность активации прочих механизмов. Для испытания электронных модулей существует целый ряд нормированных международных испытаний на стойкость к термоциклированию, которые целенаправленно ведут к деформации паяных соединений. Циклически изменяющаяся пластическая деформация паяного контакта ведет к возникновению дефектов и трещин, которые в итоге становятся причиной механического ослабления соединения и его отказа. Количество циклов до отказа определенного количества паяных соединений коррелирует с рассчитанным приростом повреждения. Однако для составления усталостной функции необходимо большое количество данных. Изменение условий тестирования позволяет получить дополнительные данные. Для переноса усталостной функции на реальные условия эксплуатации необходима их экстраполяция.

Как усталостное моделирование, так и получение данных по материалам требуют проведения большого количества экспериментов. Для построения подходящих моделей материалов для численного анализа необходимы точные измерения свойств материалов. Точность вычислений ограничена точностью используемых значений параметров материалов.

Ускорение методов тестирования

Требования, предъявляемые к методам тестирования, обусловлены, в том числе, и возрастающей температурной нагрузкой электронных модулей.

Возможные причины возрастающей температурной нагрузки:

- повышение температуры эксплуатации;
- повышение плотности компоновки электронных модулей;
- повышение мощности потерь.

Существующие методы тестирования были разработаны на основе требований при реальных условиях эксплуатации и при учете известных механизмов повреждения свинец-содержащих припоев и уже много лет используются при испытаниях для получения необходимых параметров срока службы сложных электронных модулей для различных применений. Специфика такого тестирования обоснована поставленной целью: проведения сравнительного анализа между SnPb и SnAgCu. В распоряжении исследователей — большое количество результатов испытаний, особенно для термоциклирования (Temperature Cycle Test, TCT). Философия испытаний заключается в ожидаемых условиях напряжения на границе компонент/припой/печатная плата с учетом рассогласования температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР). С помощью различных минимальных и максимальных температур (ориентируясь на реальные условия эксплуатации) и времени задержки и смены температуры (температурные градиенты) моделируют нагрузочные режимы ожидаемых реальных условий нагрузки с точки зрения ускорения. Ускорение признаков повреждения определяется выбором ΔT и $\Delta T/\Delta t$, его необходимо сравнить с ожидаемым количеством циклов при реальной эксплуатации. Далее представлен перечень возможных и примененных в данном проекте испытаний:

- TCT (термоциклирование, $-40...+150$; $-40...+125$; $-20...+100$; $-2...+85$ °C), инициирование и рост трещин (циклы IPC-9701, медленные/быстрые циклы, специфика реальных условий эксплуатации) (JESD22-A104-B: Temperature Cycling);
- MCT (Mechanical Cycle Test — механическая циклическая нагрузка, сравним с деформацией при испытании на изгиб);
- HTS (High Temperature Storage — хранение при высокой температуре, $150...175$ °C), реакция в приграничной области, ИМФ;
- Drop Performance, характеристики приграничных поверхностей (зависимость от материала, модуль упругости);
- вибрация.

В рамках проекта LiVe на первом плане стоял метод термоциклирования с быстрой и медленной сменой температур, а также с различными температурными диапазонами (разница между крайними значениями температуры). Как параллельно, так и непосредственно в связи друг с другом были проведены и комбинированные методы тестирования.

Исходя из по-прежнему недостаточного опыта тестирования по сравнению с реальными условиями эксплуатации бессвинцовых припоев был проведен подобный опыт с соответствующими возможностями измерения с помощью сенсоров в течение всего срока проведения проекта. Для исследования селективных и комбинированных методов тестирования, а также для различных требований к получению результатов были разработаны разные тестовые модули, которые, в конце концов, были использованы для подтверждения результатов на уровне прототипа.

Разработка тестовых модулей в проекте

С учетом требований различных, в том числе комбинированных, методов тестирования, а также результатов, которые должны быть получены, во время проекта были разработаны и испытаны 6 тестовых модулей. Далее более подробно будет описан модуль № 1, результаты тестирования которого были представлены на консультационном семинаре.

Тестовый модуль № 1, который также обозначается как оригинальный тестовый модуль, служит в первую очередь для оценки данных, полученных в результате известных методов тестирования, а также оценки влияния новых сплавов относительно миниатюризации компонентов. Для этого были использованы стандартные компоненты с вариацией формы и размера вплоть до миниатюрных компонентов (например, CR01005) для разных методов тестирования. В итоге было изготовлено и проанализировано около 1000 тестовых узлов для различной нагрузки. При этом были использованы:

- 7 различных сплавов припоев (включая SnPb в качестве исходного);
- 14 различных компонентов с 7 различными металлизациями контактов;
- компоненты BGA двух форм и с тремя отличающимися друг от друга металлизациями (Under Bump Metallization, UBM) и двумя сплавами для шариковых контактов компонента;
- 3 финишных покрытия печатных плат;
- разные профили для пайки с тремя различными максимальными температурами.

Во время обработки проекта были разработаны прочие тестовые модули, которые также были подвергнуты испытаниям. Тестовые модули

были разработаны и проанализированы в соответствии с различными видами испытаний:

- тестовый модуль № 2 “Screening” — испытания на удар и для отбора припоя для сокращения максимального количества припоев до двух;
- тестовый модуль № 3 — «ускоренные испытания» до проверки механизмов отказа при последовательных и чередующихся испытаниях;
- тестовые модули № 4–6 — «верификация материала» — исследование пригодности применения искомым сплавам в массовых продуктах с широким спектром компонентов и сопоставления с функциональными демонстраторами партнеров по проекту.

Концепции испытаний для оценки необходимых данных

При исследовании надежности исходят из того, что в начале испытаний все образцы исправны и выполняют свои функции. В общем случае долговечность образца устанавливается по времени в рабочем состоянии с момента начала эксплуатации и до отказа. Момент отказа определяется недопустимым отклонением как минимум одного измеряемого параметра. При исследовании надежности электронных модулей с поверхностным монтажом для детектирования отклонений используются разрушающие и/или неразрушающие методы испытаний. К неразрушающим методам относятся, в том числе, электрическое тестирование и рентгеновский анализ, а к разрушающим методам — изготовление микрошлифов (для измерения длины трещин и анализа структуры соединений) и испытание на срез. Эти методы были преимущественно использованы для ис-

пытания отдельных тестовых узлов. В связи с большим разнообразием данных и с миниатюризацией далее будут описаны специальные требования. На рис. 5 представлена не только последовательность отдельных шагов обработки оригинального тестового модуля, но и высокие требования по логистике, которая необходима в подобном испытании, и тесная связь всех задействованных в данном проекте партнеров при получении и анализе результатов.

Наряду с рентгеновским анализом, который позволяет сделать основные выводы о наличии пор в паяных соединениях и помогает объяснить связанную с этим разницу значений напряжения на срез и возможные изменения электрических функций, электрические измерения используются для детектирования первых признаков нарушения функций. Однако, несмотря на измерения при повышенной температуре, было установлено, что только почти полное разрушение паяного соединения ведет к заметному нарушению электрических функций. Исходя из этого испытание на срез с дополнительным определением характера разрушения — важный критерий механической прочности и, тем самым, функциональности паяных соединений. С помощью металлографического анализа различных компонентов были сделаны выводы, в том числе, и о возникновении и распространении трещин в паяных соединениях, а также об образовании ИМФ в зависимости от использованных поверхностей и припоев. Более подробное описание этих методов испытаний и выборочные результаты будут представлены в дальнейших частях этой статьи.

Примечание. Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen, 2008, № 6. Германия).

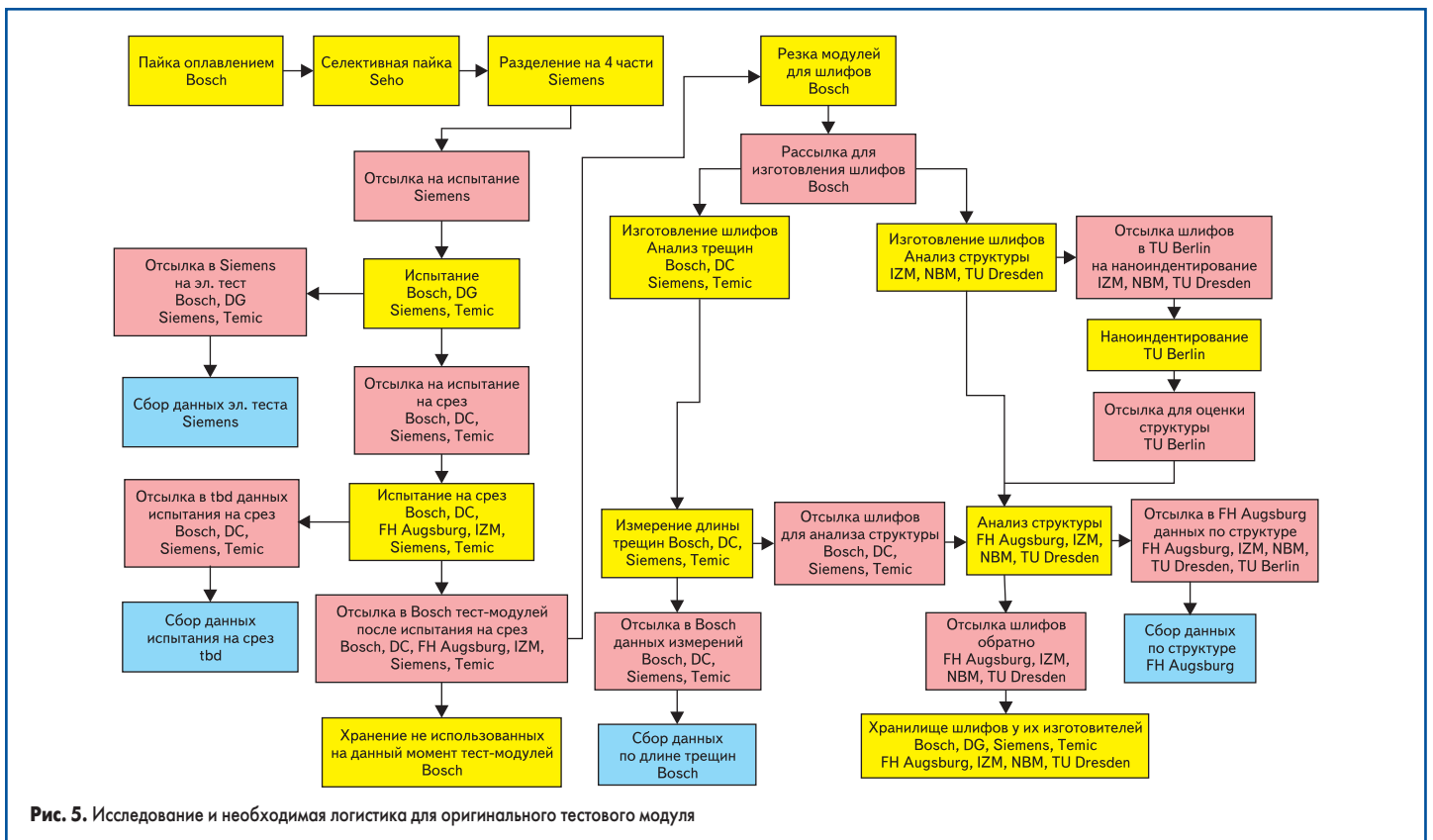


Рис. 5. Исследование и необходимая логистика для оригинального тестового модуля