

Оптимизация процесса бессвинцовой ремонтной пайки

Ремонт электронного узла должен продлить срок его эксплуатации. Однако более высокая температура плавления бессвинцовых припоев ведет к более высокой нагрузке, которая особенно критична при проведении процесса ремонтной пайки. Автоматический контроль температуры помогает сократить эту нагрузку в процессе ремонта до минимума.

Андрей Новиков

andrej.novikov@uni-rostock.de

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

Янош Толней (Janos Tolnay)

Описание исследований

Для анализа воздействия процессов пайки на надежность паяных соединений были проведены сравнительные исследования этих процессов на полуавтоматической ремонтной установке ONYX 29 компании ZEVAC и на ремонтной станции с ручным управлением. На основании этих исследований была произведена качественная и количественная оценка с помощью сравнения технологических данных (температурных профилей) и анализа полученных результатов процессов пайки.

Для эффективного проведения исследования спектр возможных компонентов был сокращен до двух типичных форм. На тестируемых электронных узлах были смонтированы компоненты двух форм: BGA256 и QFP32. Оба компонента имеют бессвинцовую металлизацию контактов в соответствии с директивой RoHS. Тестируемые печатные платы были изготовлены из стандартного материала FR4 толщиной 1,6 мм и медным слоем с обеих сторон толщиной 35 мкм.

Большая часть тестируемых электронных узлов была смонтирована с использованием бессвинцового припоя SnAgCu. Для экспериментов по ремонтной пайке свинецсодержащих электронных узлов с бессвинцовыми компонентами, а также для сравнительных исследований, несколько электронных узлов были смонтированы с применением свинецсодержащей паяльной пасты SnPb.

Из изготовленных электронных узлов в исходном состоянии и после процесса ремонта были сделаны микрошлифы, которые исследовались с помощью оптического микроскопа, а в отдельных случаях и методом растровой электронной микроскопии.

Паяльная паста наносилась с помощью ручной установки и шаблона толщиной 150 мкм. Установка компонентов производилась на системе Fineplacer компании Finetech. Пайка бессвинцовых электронных узлов осуществлялась в конденсационной печи VPP-M 600 компании IBL при температуре 230 °C, а свинецсодержащих электронных узлов — в конденсационной печи VPP-LC 280 компании IBL при температуре 203 °C. Используемые конденсационные печи оплавления позволяют проводить процесс пайки с минимальной температурной нагрузкой, особенно для компонентов формы BGA. Тем самым

можно лучше увидеть возможные различия при последующих процессах ремонтной пайки.

Оценка результатов

При оценке температурных профилей особое внимание уделялось форме кривых выше температуры плавления припоев, так как этот отрезок наиболее интенсивно способствует росту интерметаллических фаз, которые, в свою очередь, существенно влияют на надежность паяных соединений после процесса ремонта. Металлизация печатных плат в значительной степени подвержена данному процессу деградации после прохождения нескольких циклов температурной нагрузки. В записанных температурных профилях был отмечен и графически проанализирован участок кривой временной зависимости температуры выше точки плавления припоя. Площадь под кривой не имеет решающего значения для механизма повреждения, как это зачастую представляется в упрощенном виде. В связи с этим простая интеграция этой площади не является достаточной для того, чтобы охарактеризовать деградацию.

Образование интерметаллических фаз, так же как и другие естественные процессы диффузии, могут быть описаны с помощью уравнения Аррениуса:

$$d = k\sqrt{t},$$

где $k(T) = k_0 \times \exp(-Q/(R \times T))$; d — толщина интерметаллической фазы, k — коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$; t — время, с ; k_0 — константа материала, $\text{см}^2/\text{с}$; Q — энергия активации, Дж/моль ; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(К \cdot моль) ; T — абсолютная температура, К .

Согласно данному уравнению температура оказывает экспоненциальное влияние на рост интерметаллических фаз, а время влияет как квадратный корень. Тем самым температура имеет большее влияние, чем время, и это необходимо учитывать при сравнении потенциалов деградации паяных соединений. В связи с этим сравнение температурных профилей происходило с помощью расчета теоретического роста интерметаллических фаз на границе между припоем и медной контактной площадкой. Так как фактические значения постоянного коэффициента роста k и энер-

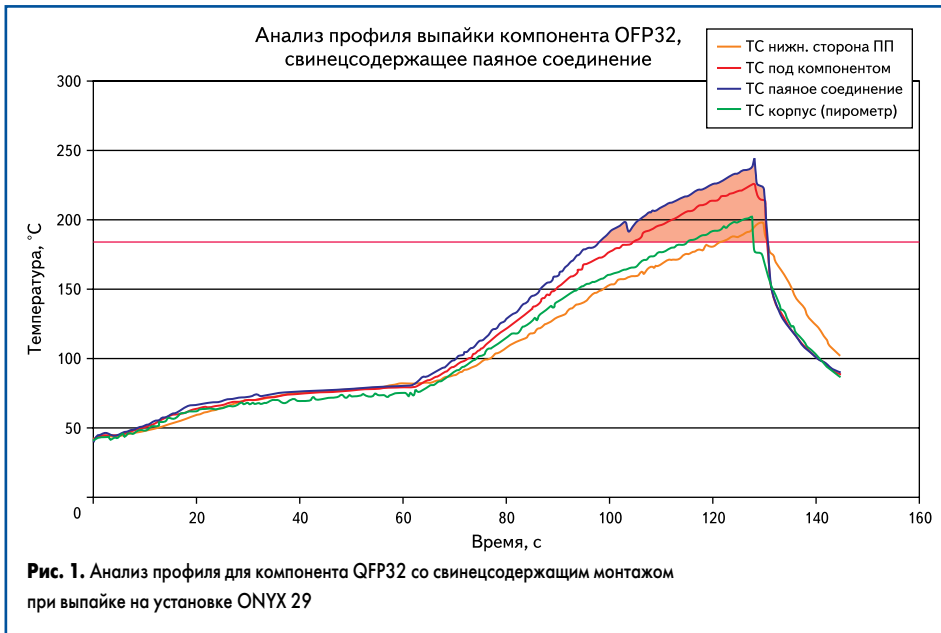


Рис. 1. Анализ профиля для компонента QFP32 со свинецсодержащим монтажом при выпайке на установке ONYX 29

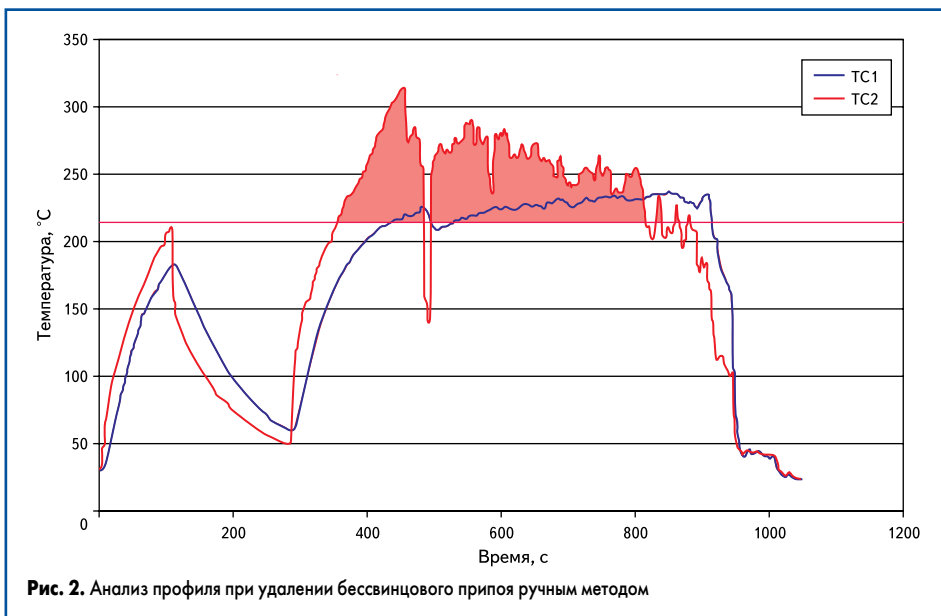


Рис. 2. Анализ профиля при удалении бессвинцового припоя ручным методом

гии активации Q зависят от многих факторов (сплав, объем паяного соединения, температура, давление), сначала для сравнения были использованы стандартные значения для припоя SnPb на медной подложке, взятые из источника [1]:

- Энергия активации для фаз SnCu: 45 кДж/моль.
- Константа роста SnPb/Cu: 0,0016 м/√с.

Для бессвинцового припоя SnAgCu не существует подтвержденных значений константы роста при данных условиях. Из имеющегося опыта и на основании проведенных исследований различных механизмов деградации значение константы может быть до десяти раз более, следовательно, $k = 0,016$ м/√с. Однако для сравнительной оценки температурных профилей точные значения коэффициентов не играют роли, так как возможные отклонения в вычисленных значениях одинаковы и не оказывают существенного влияния на данную оценку.

При проведении процессов выпайки и повторной пайки компонентов проводилось измерение температуры в различных точках электронного узла. При ремонте вручную температурные профили, измеренные на разных

электронных модулях, могут отличаться друг от друга, а точное измерение температуры в паяном соединении практически осуществимо лишь в предварительном испытании. Паяные соединения, после пайки с помощью

ремонтной станции ONYX 29 с полуавтоматическим управлением, имеют, напротив, хорошую воспроизводимость. При выпайке компонентов температура могла быть измерена в различных пунктах электронного узла, паяного соединения, корпуса компонента, печатной платы сверху и снизу. При повторной ремонтной пайке температура печатной платы и компонента измерялась бесконтактно с помощью пирометра. На рис. 1 в качестве примера представлена измеренная температурная нагрузка компонента QFP32 при выпайке на полуавтоматической ремонтной станции. Красным цветом обозначена область, которая, прежде всего, способствует образованию интерметаллических фаз.

Процесс удаления припоя также оказывает значительное влияние на рост интерметаллических фаз, по крайней мере, со стороны печатной платы. Этот процесс особенно трудно определить при ручной пайке, он зависит от многих субъективных факторов. Пример ручного удаления остатков припоя с помощью многопроволочного провода проанализирован на рис. 2. Области температурного профиля, обозначенные красным цветом, показывают время и температуру, которые оказывают влияние на рост интерметаллических фаз.

С помощью уравнения Аррениуса была теоретически вычислена толщина интерметаллической фазы при изготовлении электронных узлов, после процессов выпайки и повторной пайки. На рис. 3 представлена температурная нагрузка данных процессов относительно пайки в конденсационной печи при температуре в 230 °C для компонента в корпусе BGA. Можно заметить, что температурная нагрузка после процесса полуавтоматического ремонта ненамного выше исходной нагрузки во время пайки в конденсационной печи. Нагрузка после ручного процесса ремонта компонента BGA почти в 4 раза превышает исходную нагрузку.

Анализ результатов пайки

После расчетной оценки профилей пайки на основании переноса тепла в процессе пайки и вычисленного из этих значений роста фаз, на некоторых выбранных позициях электрон-

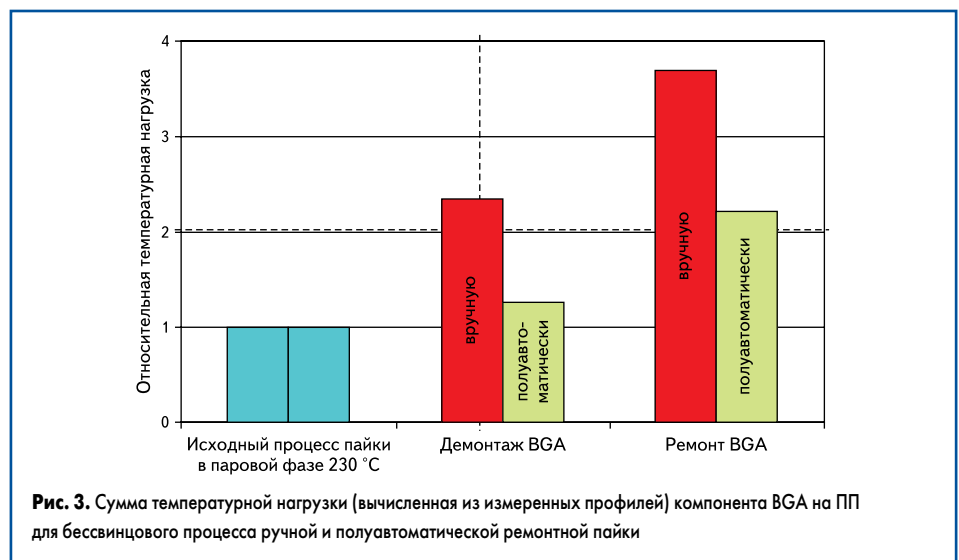


Рис. 3. Сумма температурной нагрузки (вычисленная из измеренных профилей) компонента BGA на ПП для бессвинцового процесса ручной и полуавтоматической ремонтной пайки

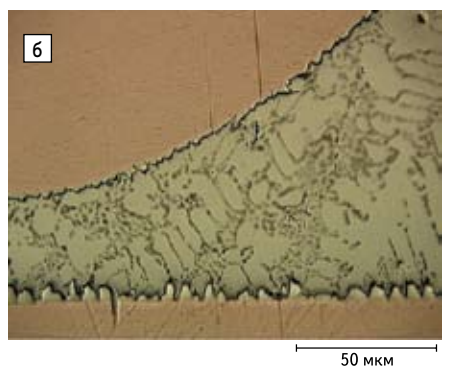
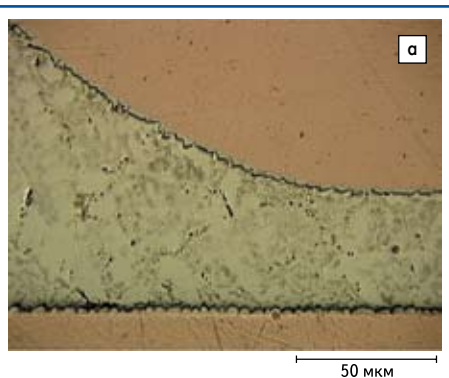


Рис. 4. Микрошлиф паяного соединения компонента QFP32 с монтажом припоем SnPb (при 1000-кратном увеличении):
 а) повторная пайка на полуавтоматической станции (ONYX 29);
 б) повторная пайка вручную (DRS 22)

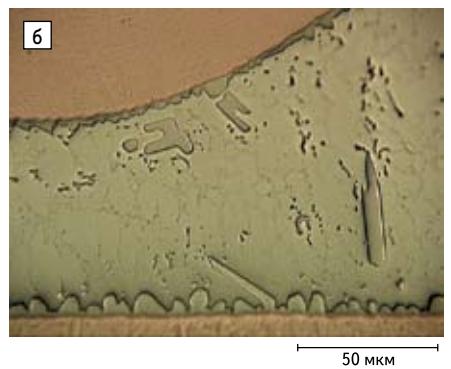
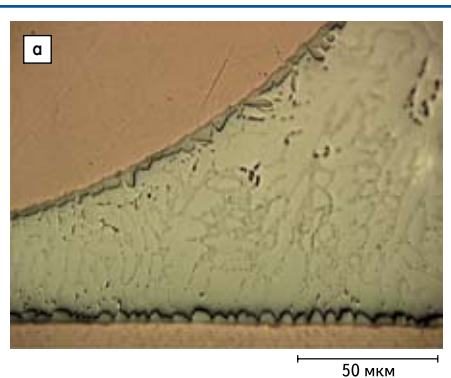


Рис. 5. Микрошлиф паяного соединения компонента QFP32 с монтажом бессвинцовым припоем (при 1000-кратном увеличении):
 а) повторная пайка на полуавтоматической станции (ONYX 29);
 б) повторная пайка вручную (DRS 22)

ных модулей был проведен металлографический анализ. В ходе анализа была исследована структура паяных соединений, возможные дефекты (поры, включения), недостаточное смачивание, расслоения в паяных соединениях и, естественно, образование интерметаллических фаз. Представленные далее снимки микрошлифов, сделанные с помощью оптического микроскопа, оценивались специально на предмет толщины интерметаллических фаз со стороны печатной платы. С этой целью измерение проводилось на снимках с одинаковым увеличением. В ходе измерения были вычислены и использованы в окончательной оценке средние, максимальные и минимальные значения в различных местах паяных соединений.

На рис. 4 показаны паяные соединения компонента QFP32 после повторной пайки с применением свинецсодержащего припоя. Хотя рост интерметаллических фаз происходит значительно медленнее по сравнению с бессвинцовыми припоями, при 1000-кратном увеличении видны явные различия между ручным и полуавтоматическим процессами пайки. После повторной пайки на полуавтоматической ремонтной станции ONYX 29 интерметаллические фазы практически незаметны, в то время как после ручного ремонта виден явный рост интерметаллических фаз, по крайней мере, со стороны печатной платы. Также хорошо видна эвтектическая структура, типичная для свинецсодержащих паяных соединений.

Результаты исследований бессвинцовых электронных узлов с компонентом QFP32 представлены на рис. 5. В данном случае интерметаллические фазы в целом заметнее, чем в свинецсо-

держающих паяных соединениях. Также в паяных соединениях явно видны интерметаллические фазы CuSn и AgSn.

На рис. 6 в качестве примера представлены средние значения толщины интерметаллических фаз, измеренные в микрошлифе компонента QFP после выпайки. В данной гистограмме проведено сравнение значений после пайки оплавлением (изначальное значение) с данными после повторного процесса пайки с ручным управлением и с полуавтоматическим управлением. Целью повышения надежности паяных соединений является ограничение роста интерметаллических фаз. Поэтому высокие столбики (и, следовательно, большая

толщина интерметаллических фаз) соответствуют критическим значениям и возможно-му снижению надежности.

Во всех проведенных исследованиях процесс повторной пайки с полуавтоматическим управлением более предпочтителен, чем процесс с ручным управлением. Примечательно также и то, что значение толщины фаз в 3,5–4,5 мкм, измеренное в изначальном состоянии после пайки оплавлением, соответствует теоретически вычисленному значению в 5 мкм. Порядок величины и соотношения всех последующих измерений подтверждают предыдущие высказывания, хотя вычисления на основании уравнения Аррениуса с экстремальным 10-кратным значением скорости роста фаз превышает действительное значение примерно на 30–40%. Преимущество полуавтоматического управления особенно явно в процессе выпайки. В данном случае различия в измеренных значениях толщины фаз очень заметны.

Анализ содержания свинца

При ремонте свинецсодержащих электронных узлов с бессвинцовыми компонентами (данная ситуация типична для фазы перехода на производство бессвинцовых электронных модулей и ремонта уже произведенных модулей) важную роль играют остатки припоя после выпайки и процесс их удаления. В связи с тем, что смешанная технология, а именно комбинация свинецсодержащих покрытий и бессвинцового припоя, представляет собой потенциал для возникновения проблем надежности, этот вопрос является наиболее актуальным и критическим. К сожалению, на данный момент не существует подтвержденных результатов исследований для допустимого количества свинца в «бессвинцовых» паяных соединениях; есть только опыт того, что могут возникать определенные проблемы. Допустимое законом значение в 0,1% также не помогает решить данную проблему, так как оно не имеет технического обоснования. Так как за счет ремонта свинецсодержащих электронных модулей не может быть достигнуто соответствие директиве RoHS,

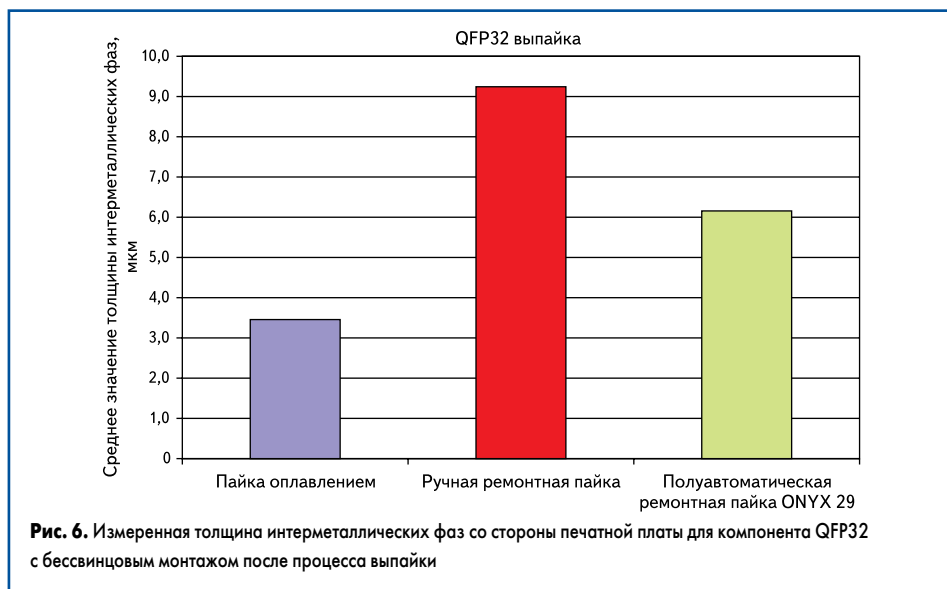


Рис. 6. Измеренная толщина интерметаллических фаз со стороны печатной платы для компонента QFP32 с бессвинцовым монтажом после процесса выпайки

это граничное значение не играет роли для применения ремонтного процесса пайки.

Содержание свинца в остатках припоя на контактных площадках после процесса выпайки было химически проанализировано с помощью измерений методом растровой электронной микроскопии и рентгеновской флуоресценции с дисперсией по энергии (REM/EDX). При этом были проведены измерения с интеграцией площади контактной площадки. Точность измерений составляет около 1%.

Сначала были исследованы контактные площадки компонента BGA после выпайки. Остатки припоя после выпайки компонента с ручным управлением процесса содержат примерно 10% свинца (процент по весу), в то время как после выпайки с помощью полуавтоматической станции ONYX 29 остатки припоя на контактной площадке содержат лишь 4,5% свинца. Это возможно из-за того, что свинец содержится преимущественно в легкоплавкой части припоя, которая расплавляется в процессе пайки и может быть удалена. Напротив, высокоплавкие фазы на границе к медной контактной площадке содержат исключительно медь и олово, но там практически нет свинца.

После ремонта тестовой печатной платы с бессвинцовым компонентом BGA было также измерено содержание свинца. Результаты измерения представлены на рис. 7. Наряду с основным компонентом — оловом — было зафиксировано менее 1% свинца.

В отличие от тестовых электронных модулей с компонентами BGA, в которых бессвинцовый припой добавляется в форме шариков припоя компонента, ремонт электронных модулей с компонентами QFP с остатками припоя SnPb на контактных площадках производился без добавления бессвинцового припоя. Небольшая толщина бессвинцового покрытия (Sn) компонента не оказывает влияния на припой в паяном соединении. В соответствии с этим результаты измерений после ручной и полуавтоматической выпайки компонентов имеют практически одинаковые значения содержания свинца — 44% и 41%, которые почти соответствуют эвтектическому соотношению припоя SnPb.

При неблагоприятном случае с максимальной толщиной слоя остатков припоя после ручного процесса удаления содержание свинца составляет 6% (вес). Данное значение более чем в два раза превышает максимальное значение при полуавтоматическом удалении остатков припоя и ведет к локальному снижению температуры плавления менее 200 °C [2] и тем самым к ощутимому изменению свойств паяного соединения. В связи с этим негативное влияние на надежность свинецсодержащих электронных модулей с бессвинцовыми компонентами BGA с ручным процессом ремонта не может быть исключено, в то время как подобные проблемы скорее невозможны для модулей после полуавтоматического удаления остатков припоя.

Выводы

Полуавтоматическое управление температурными профилями с параметрами, предварительно полученными опытным путем,

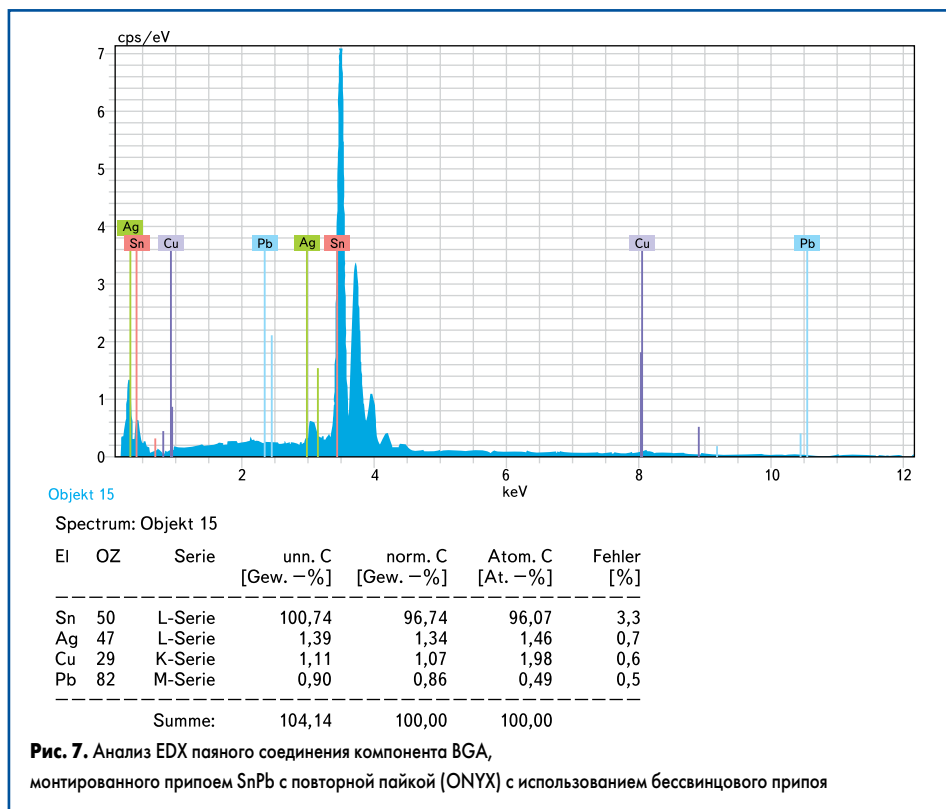


Рис. 7. Анализ EDX паяного соединения компонента BGA, монтированного припоем SnPb с повторной пайкой (ONYX) с использованием бессвинцового припоя

было последовательно применено при ремонте электронных узлов, что способствовало эффективному проведению экспериментов. В отличие от электронных узлов с ручным процессом ремонта не было зафиксировано повреждений компонентов и модулей вследствие перегрева. Количественная оценка эффективной температурной нагрузки была проведена путем анализа измеренных температурных профилей. Влияние температуры и времени было сопоставлено с помощью расчета теоретически возможного (максимального) роста интерметаллических фаз. При этом полученные значения использовались в качестве масштаба для связанных с диффузионными процессами, термически инициированными процессами старения. Это сравнение показывает явные преимущества, которые могут быть достигнуты с помощью полуавтоматического управления ремонтного процесса по сравнению с процессом ручной пайки. Естественно, различия особенно хорошо видны при ремонте компонентов с более сложной формой, в данном случае BGA 256 со скрытыми паяными соединениями. После выпайки и повторной пайки компонентов с критической формой рассчитанное значение толщины интерметаллических фаз после температурной нагрузки составляет для полуавтоматического процесса 12 мкм, а для ручного процесса — 20 мкм.

После вычисления температурной нагрузки из профилей был проведен анализ поперечных срезов. Хотя измеренные абсолютные значения толщины интерметаллических фаз в паяных соединениях были ниже, чем предполагаемые максимальные значения из теоретической оценки, тенденции и соотношения были однозначно подтверждены. Электронные узлы после ручного процесса ремонта имеют интерметаллические фазы с большей толщиной.

Наиболее критическим при ручном ремонте является процесс удаления остатков припоя. Измеренное значение толщины интерметаллической фазы в электронном узле с BGA-компонентом после ручного процесса ремонта составляет 6,9 мкм, что заметно выше (на 50%) измеренного значения интерметаллической фазы аналогичного модуля после ремонта на полуавтоматической станции ONYX 29, а именно 4,6 мкм.

После анализа процесса удаления припоя относительно остаточного содержания свинца в свинецсодержащих модулях с бессвинцовыми компонентами BGA было получено значение 1%. Это значение хотя и превышает допустимое директивой RoHS значение содержания свинца (0,1%) в бессвинцовых электронных узлах, но ремонтируемый свинецсодержащий модуль уже изначально не соответствует данной норме. Для ожидаемой надежности, на которую смешанная технология может оказывать негативное влияние, остаточное содержание свинца в 1% согласно имеющимся на данный момент результатам не ведет к проблемам. Сравнительно небольшое значение содержания свинца может быть также достигнуто в благоприятном случае для свинецсодержащих электронных узлов после ручного ремонта. Однако это значение имеет большой разброс, и поэтому содержание свинца в паяном соединении может достигать даже 6%, что уже оказывает влияние на свойства паяных соединений.

Окончание следует

Литература

1. Wassink K. Weichlöten in der Elektronik. Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 2. Aufl. 1992.
2. Nowotnick M. Kapitel Zuverlässigkeit im RoHS Handbuch. Forum Verlag Herkert. 2006.