

Процессы, влияющие на надёжность паяных соединений поверхностного монтажа

Константин Тихомиров, Сергей Алексеев (Санкт-Петербург)

«Электроника – наука о контактах». Эта старая инженерская мудрость не потеряла значения и сегодня, когда количество контактов на одной плате исчисляется тысячами, а порой и десятками тысяч. Причём большую часть из этих тысяч составляют выводы компонентов, припаянные к контактным площадкам платы. Обеспечение надёжности паяных соединений – одна из самых актуальных проблем в общем ряду усилий по достижению высокой и стабильно воспроизводимой надёжности радиоэлектронной аппаратуры. Уже стало очевидным, что издавна практикуемый подход, опирающийся в основном на испытания изготовленных образцов, требует слишком больших временных и материальных затрат, и при этом не всегда обеспечивает гарантированный результат. Мир уже давно использует методики надёжного проектирования, а вот в России движение в этом направлении только начинается.

От тестирования к надёжному проектированию

В наши дни монтаж высококачественных электронных модулей с повышенной и повторяющейся от экземпляра к экземпляру надёжностью может обеспечить только автоматизированная сборка. С ростом миниатюризации на доминирующие позиции вышел поверхностный способ установки компонентов – по сравнению с монтажом в сквозные отверстия. Поэтому в данной статье вопросы надёжности паяных соединений (ПС) будут рассматриваться применительно к автоматизированной технологии поверхностного

монтажа (АТПМ). Отличительной особенностью АТПМ является снижение влияния человеческого фактора при конкурентной себестоимости. Но нельзя забывать, что, хотя надёжность ПС поверхностного монтажа обеспечивается технологией изготовления, но закладывается она на стадии проектирования [1–3]. И если методы обеспечения высокого уровня надёжности РЭА на этапах производства и эксплуатации общеизвестны и заключаются в строжайшем соблюдении технологических требований, проведении технологических прогонов и тренировок комплектующих изделий, наличии отлаженного системного контроля за выполнением всех инструкций персоналом, отвечающим непосредственно за линию сборки, и мониторинге работоспособности состояния системы (производства), то обеспечение высокого уровня надёжности на этапе разработки радиоэлектронной аппаратуры зачастую остаётся без должного внимания [4–6].

За рубежом надёжное проектирование занимает особое место. Проблемами надёжности занимаются такие организации, как Центр перспективного проектирования жизненного цикла изделий при Мэрилендском университете США (The Center for Advanced Life Cycle Engineering, CALCE); Сандийские национальные лаборатории (Sandia National Laboratories); Цирвайб (CirVibe Inc.), компания Реше-

ния для конструкций по обеспечению надёжности (DfR Solutions), Международные решения в области электронных конструкций (Electronics Packaging Solutions International Inc) и др. Каждая из этих компаний занимается расчётом надёжности паяных соединений в изделиях заказчиков, в том числе и для жёстких условий эксплуатации. Широко используются методологии, направленные на снижение конечной стоимости продукта и увеличение надёжности в заданных условиях эксплуатации, такие, как Design for X, где X может обозначать обеспечение конструкционной надёжности (R-процесс), учёт требований и ограничений производства (M-процесс) и т.д.

В России наиболее распространённым способом обеспечения надёжности разработанного изделия РЭА до сих пор остаются испытания прототипов – итерационный процесс изготовления образцов (максимально жёсткое тестирование и устранение выявленных слабых мест конструкции), длящийся либо до достижения стабильного состояния устройства, либо, в худшем случае, до истощения средств и/или временного ресурса (см. рис. 1).

Этот метод имеет множество недостатков, таких как времязатратность и высокая стоимость. Зачастую использовать/исправить устройства после нахождения ошибки/отказа невозможно. Данный процесс не всегда позволяет гарантированно выявлять конструкторские ошибки, к тому же условия тестов во многих случаях не соответствуют реальным условиям использования устройства. Альтернативой, а точнее дополнением к нему, сейчас повсеместно становится надёжное проектирование.

Надёжное проектирование пока не получило широкого применения среди отечественных разработчиков. В части, относящейся к АТПМ, это, в первую очередь, связано с отсутствием нормативно-технической документации по прогнозированию и оценке надёжности паяных соединений поверхностного монтажа. В настоящее время расчётно оценить надёж-

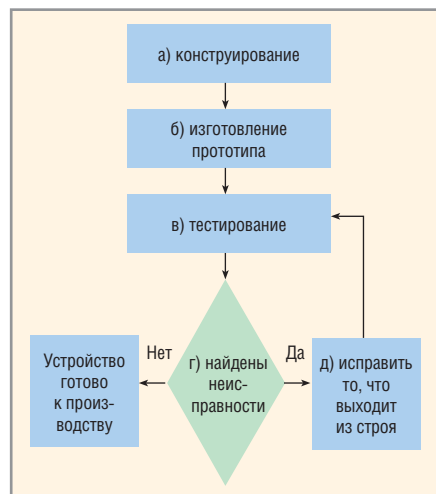


Рис. 1. Стандартный метод доведения надёжности разработанного устройства до требуемого уровня

ность паяного соединения и электронного модуля в целом можно только по справочнику «Надёжность электрорадиоизделий» [6]. Но для АТПМ справочник не даёт даже такой ограниченной возможности оценки, поскольку в действующей его редакции приведены данные только для пайки ЭРИ волной, ручной пайки ЭРИ с накруткой и без неё (см. таблицу 1).

В такой ситуации актуальной проблемой является освоение самых эффективных, современных и точных методов прогнозирования надёжности ПС. Такие методики, опирающиеся на физическую теорию надёжности, позволяют существенно сократить производственный цикл продукта и снизить его конечную стоимость, а также увеличить достоверность результатов, спрогнозированных для использования устройства в реальных условиях эксплуатации, по сравнению с сегодняшней практикой, использующей, фактически, эмпирические значения надёжностей ПС, взятые из устаревшего справочника, в котором отсутствуют значения интенсивности отказов для ПС поверхностного монтажа и не рассматриваются бессвинцовые соединения.

Усталостное прогнозирование надёжности паяных соединений – это сложнейшая задача, требующая использования знаний из разных разделов физики, которые нужно учитывать и хорошо понимать для составления конституционных уравнений зависимости свойств припоев от разных условий эксплуатации, проектирования геометрии соединения и сборки, состоящей из чипа, компонента и печатной платы, установки параметров технологического процесса при производстве и т.д. Большинство усталостных отказов могут быть отнесены на счёт термомеханических напряжений, возникающих, в основном, из-за различия коэффициентов термического расширения (КТР) компонента, припоя и подложки или печатной платы (ПП) [7]. Однако следует отметить, что причина отказа (разрушения ПС) может происходить из-за других факторов, действующих как по отдельности, так и совместно [8]. Типы прикладываемых нагрузок и возникающих из-за них процессов в ПС приведены на рисунке 2.

Во время эксплуатации эти поля воздействий являются временно и пространственно зависимыми [9]. Кроме того, некоторые из них взаимозависимы. Так, например, джоулев нагрев

определяется плотностью тока, которая может варьироваться из-за электромиграции (ЭМ), а состояние механического напряжения складывается из напряжений, которые обусловлены различием КТР, напряжений, развивающихся из-за миграции атомов/ионов вследствие действия сил «электронного ветра», а также внешних нагрузок, действующих на данный участок конструкции устройства. Среди перечисленного наибольший вклад в процесс формирования условий, снижающих надёжность ПС, вносят: структура прочности и жёсткости конструкции, термомеханическая усталость, электромиграция и термомиграция (ТМ). В случае бессвинцовых ПС этот список пополняется ростом «усов» – следствие сжимающих внутренних напряжений. Стоит отметить, что среди перечисленных пяти процессов электромиграция, термомиграция и рост «усов» стали проблемами надёжности ПС в основном вследствие миниатюризации электронных устройств. Продолжение этой тенденции приведёт к тому, что всё больший вклад в суммарное повреждение будет вносить взаимное действие полей нагрузок.

Рассмотрим подробнее эти пять проблем.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ УСТАЛОСТЬ

Термические воздействия – один из наиболее сильных факторов. Они способны нанести ПС значительные повреждения, влияющие на его надёжность. Накопление в ПС повреждений, вызванных ТМУ, происходит вследствие сильно выраженной неоднородности распределения напряжений, обусловленных различием коэффициентов температурного расширения между разными элементами, формирующими ПС. Значение имеют все параметры температурного режима: рабочие уровни температуры, скорость нагрева и охлаждения (исследования показали, что она оказывает весьма сильное влияние на надёжность ПС), разница



Рис. 2. Процесс накопления повреждений в результате воздействия различных полей нагрузок, возникающих во время эксплуатации (прямые процессы – ЭМ, ПП, ТМ), и их взаимодействия друг с другом (процессы, действующие совместно – ТМУ, ДжН, НТ)

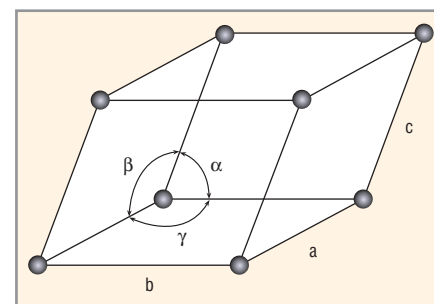


Рис. 3. Элементарная ячейка кристаллической решётки олова (в случае объёмно-центрированной тетрагональной решётки $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$)

температур в соседних локациях, время задержки на максимальном и минимальном экстремуме и т.п.

В этой проблеме есть и другие аспекты. Так, до сих пор не получил широкой известности тот факт, что главной причиной, способствующей накоплению повреждений, может стать анизотропия олова, т.к. разница КТР между a- и c-направлениями объёмно-центрированной тетрагональной β -фазы олова (см. рис. 3) почти в два раза больше, чем разница КТР между поликристаллической медью и поликристаллическим оловом.

Проявление повреждений из-за ТМУ происходит обычно после нескольких

Таблица 1. Значения базовой интенсивности отказов различных видов соединений

Вид соединения	$\lambda \times 10^8, 1/ч$
Ручная пайка ЭРИ без накрутки	0,13
Ручная пайка ЭРИ с накруткой	0,007
Пайка ЭРИ волной	0,0069
Сварка	0,0015
Обжимка (опрессовка)	0,012
Беспаяное соединение накруткой	0,00068
Скрутка	0,026

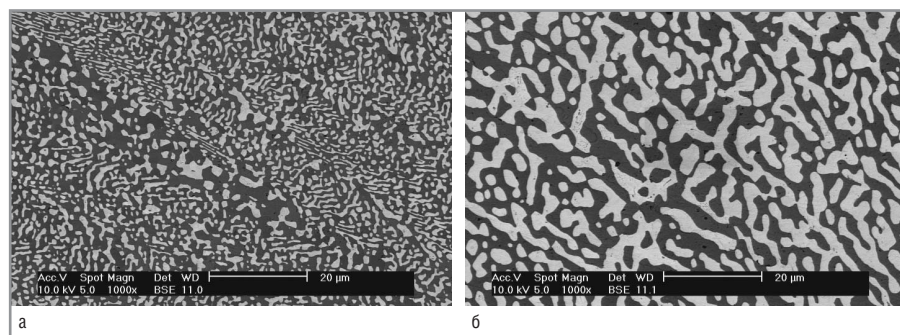


Рис. 4. Микроструктурное укрупнение частиц в богатой свинцом фазе припоя 63Sn37Pb в условиях температурного старения: а – исходное состояние; б – укрупнение

сотен температурных циклов, несмотря на то, что остаточные механические и электрические характеристики значительно ухудшаются с самых ранних стадий ТМУ. Преобладающие режимы повреждения, спровоцированного ТМУ – скольжение границ зёрен и декогезионное разрушение, вызванное микроструктурным укрупнением. Эти события происходят во всём ПС, однако наибольшее количество повреждений накапливается в регионах, примыкающих к подложке, и в интерметаллических слоях. Ограничения, накладываемые на перемещение подложкой в этих регионах, приводят к появлению локализованных деформаций. В течение более поздних стадий ТМУ, когда остаточные свойства имеют склонность к нормализации, поверхностное повреждение прогрессирует в индивидуально распределённых (микро-) разломах и вызывает фатальное разрушение.

Надо отметить, что наибольшее развитие к настоящему времени получил аналитический аппарат прогнозирования надёжности ПС, ориентированный именно на учёт влияния на неё термомеханической усталости. Главной проблемой, как выяснилось [8], оказалось укрупнение интерметаллических соединений, влияющее на надёжность ПС (см. рис. 4).

ЭЛЕКТРОМИГРАЦИЯ

Электромиграция в припоях стала важной проблемой в последнее время. Ранее величины плотности тока в электронных межсоединениях не достигали значений, вызывающих в ПС эффекты, требующие учёта с точки зрения надёжности. Сегодня продолжающаяся миниатюризация электронных компонентов в совокупности с увеличением рабочих температур электронной аппаратуры сделало ЭМ одной из потенциальных проблем

надёжности ПС. Негативные явления, связанные с ЭМ, обусловлены, прежде всего, используемыми материалами. ПС представляет собой многофазный сплав, свойства которого, изменяясь под влиянием ЭМ, будут существенно зависеть от присутствующих атомных частиц, взаимной диффузивности в твёрдом состоянии входящих в ПС веществ, морфологических особенностей микроструктурных составляющих и фазовой стабильности.

Разработанные к сегодняшнему дню расчётные методы исследования ЭМ не позволяют точно спрогнозировать время появления отказа из-за воздействия этого явления. Однако есть инструменты, позволяющие его смоделировать и, в случае превышения негативными последствиями ЭМ некоторых критических величин, предложить пути улучшения конструкции устройства.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ

В составе РЭА ПС могут подвергаться деформациям, вызванным механическими нагрузками на аппаратуру, воздействием внешней температуры, нагревом в результате прохождения электрического тока, а также влиянием других факторов окружающей среды, действующих во время изготовления и эксплуатации аппаратуры. При этом надо понимать, что исследования надёжности, проводимые на собранных устройствах и тем более на блоках РЭА, состоящих из многих устройств, как правило, не могут адекватно оценить проблемы механических состояний, возникающие на уровне материалов, конструктивных параметров токопроводящей структуры платы, геометрических и физико-химических характеристик ПС. С другой стороны, исследования, которые проводятся на образцах ПС без каких-либо ограничений, учитывающих конфигурацию ПС в РЭА, не дают полной картины предпо-

сылки к возможному отказу ПС по механическим причинам.

Так, для исследования механического фактора развития повреждения в ПС компонентов в корпусах BGA, CSP и др. проводятся испытания, при которых ударная нагрузка прикладывается к каждому шариковому выводу ПС – испытание на ударный изгиб по Шарпи (стандарты ГОСТ Р ИСО 148-1-2013, ASTM E23, ISO 148-1, EN 10045-1). Однако в условиях реальной эксплуатации РЭА паяные соединения, как правило, испытывают влияние ударной нагрузки, приложенной в каких-либо других точках конструктива модуля – не тех, которые нагружаются в ходе указанных тестов. Следовательно, такие тесты не могут обеспечить необходимую детальную информацию о напряжённых состояниях, видах разлома и т.д., которая критически важна в конструкторском дизайне или надёжном проектировании [10].

Ещё одна очевидная причина, по которой испытания не способны ответить на все вопросы по прочности и надёжности ПС, – отсутствие в нормативной документации тестов, соответствующих некоторым ситуациям реальной эксплуатации. Например, в автомобильной и аэрокосмической промышленности существуют несколько сценариев, когда случайное столкновение может приводить к повторяющимся ударным нагрузкам, что никак не имитируется во время тестов, регламентированных действующими стандартами.

При изучении надёжности ПС как функции его механического состояния приходится принимать во внимание большое число самых разнообразных причин возможного отказа, обусловленных нюансами технологии изготовления. Хороший пример такого рода – зависимость надёжности пайки компонентов BGA от способа, которым были получены контактные площадки на ПП.

Дело в том, что существует два основных типа контактных площадок, на которые устанавливаются корпуса BGA: площадки, ограниченные металлом (Metal Defined, MD), и площадки, ограниченные паяльной маской (Solder Mask Defined, SMD). Вокруг площадок MD в паяльной маске имеются просветы, а в случае использования технологии SMD маска частично заходит на края контактной площадки. Диаметр площадок SMD при прочих рав-

ных условиях больше, чем диаметр площадок MD, то есть они лучше сцеплены с поверхностью платы. По этому частному показателю они предпочтительны с точки зрения надёжности ПС. Однако с ними связана проблема другого рода: материал паяльной маски, расширяясь от нагрева в процессе пайки, деформирует шариковые выводы компонента BGA, искажая геометрию паяного соединения и создавая в шарике концентратор напряжений, что может привести к возникновению трещин на монтажной поверхности (см. рис. 5). Этот эффект, почти микроскопический по размерам, тем не менее, настолько серьёзен, что ГОСТ Р 56427-2015 в пункте 6.3.4.2 прямо запрещает «использовать компоненты типа BGA, у которых контактные площадки ограничены паяльной маской» при сборке печатных узлов класса С (электронная аппаратура ответственного назначения) [11].

Говоря о компонентах типа BGA, можно также отметить важную роль, которую играет размер шариковых выводов. В зависимости от размера шариков надёжность таких ПС в различных условиях может сильно меняться. Например, в работе [12] показано влияние толщины и формы аперттуры трафарета на механическую надёжность ПС BGA.

ТЕРМОМИГРАЦИЯ

Термомиграция – это эффект, схожий с термодинамическим эффектом Соре в жидкостях [13], заключающийся в появлении в смеси градиента концентрации компонентов вследствие разности температур её участков. В результате термомиграции в ПС из-за действия высоких температур может происходить микроструктурное укрупнение фаз (см. рис. 4).

Во время ускоренных испытаний на электромиграцию Хуанг и соавторы [14] обнаружили, что ПС, в данный момент не находящиеся под током, но соседствующие с теми, через которые был пущен ток, могут быть подвержены термомиграции. Они вычислили: чтобы наблюдать термомиграцию Sn и Pb, требуется температурный градиент 1000°C/см. Чен и соавторы [15] обнаружили, что для термомиграции Cu требуется температурный градиент 400°C/см. Причём такая термомиграция происходит, когда ПС находится в твёрдом состоянии. В расплавленном состоянии диффузия будет идти в несколько

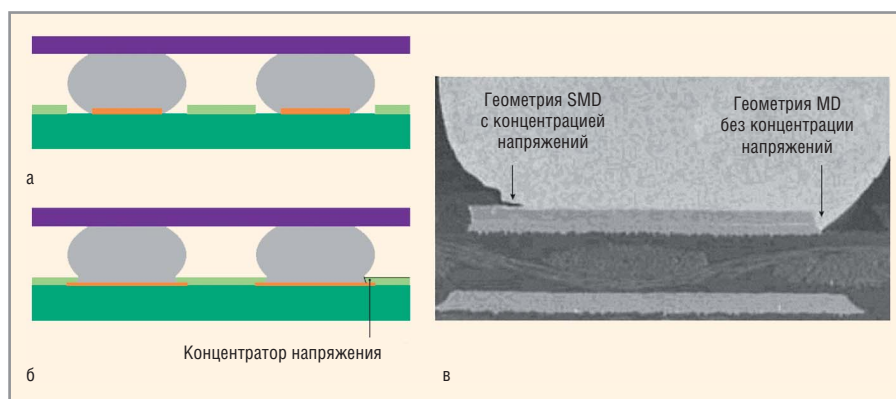


Рис. 5. Два типа площадок для установки компонентов BGA: а – площадки MD (припой может свободно растекаться вокруг кромки площадки); б – площадки SMD (паяльная маска ограничивает контактную площадку); в – сопоставление геометрии паяного соединения по технологиям MD и SMD

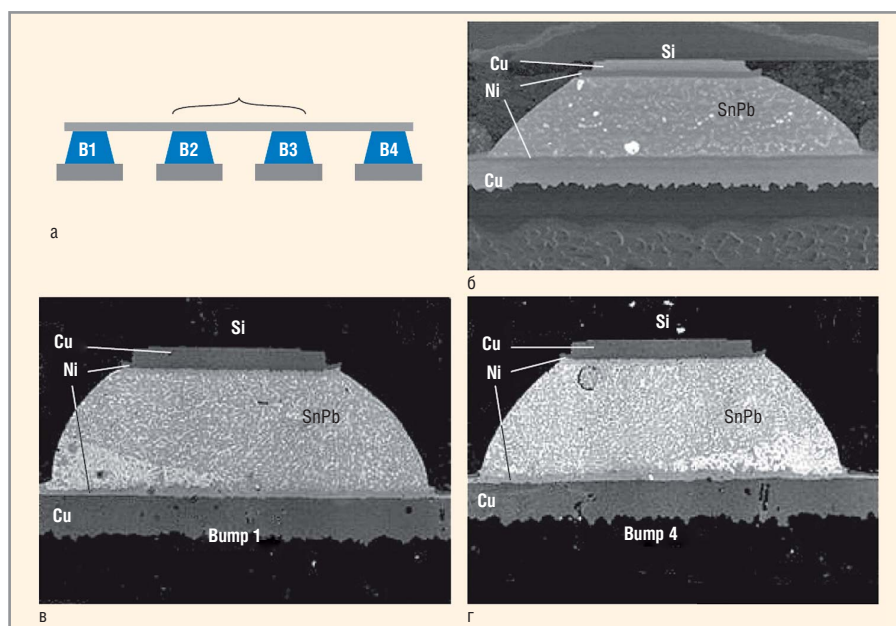


Рис. 6. Термомиграция, вызванная теплотой джоулева нагрева: а – схема условий проведения ускоренных испытаний на термомиграцию; б – до начала термомиграции; в – термомиграция в выводе Bump 1 после 6 часов при комнатной температуре и токе 1,88 А; г – термомиграция в выводе Bump 4 после 6 часов при комнатной температуре и токе 1,88 А

раз быстрее, соответственно, будет требоваться значительно меньший температурный градиент.

Стоит отметить, что перераспределение частиц в Sn-Pb следует правилу: поток частиц Pb стремится к более холодной зоне, а Sn – к более горячей (см. рис. 6). Поскольку в эксперименте, отображённом на рисунке 6 [15], источник джоулева нагрева находился между выводами 1 и 4, то наиболее холодная зона вывода 1 располагалась слева, а вывода 4 – справа. Соответственно, богатая свинцом фаза мигрировала в этих направлениях.

Часто ЭМ и ТМ сопутствуют друг другу. На ПП в непосредственной близости от данного ПС может располагаться нагретый элемент, создающий в этом ПС градиент температур

и, таким образом, активирующий в нём процесс термомиграции. А в самом ПС текущий через него ток вызывает электромиграцию. В таком случае разделение и укрупнение фаз происходит под совместным воздействием ЭМ и ТМ.

Для взаимодействия ЭМ и ТМ не обязательно изначальное наличие градиента температур, вызываемого внешними по отношению к ПС источниками. Иногда геометрия ПС может быть неблагоприятной с точки зрения электромиграции, так что последняя приводит к локальному возрастанию джоулева нагрева в таком ПС [16]. Разница может быть очень небольшой, но при высокой степени миниатюризации она способна вызвать значительные температурные градиенты, которые спровоцируют дополнительные микрострук-

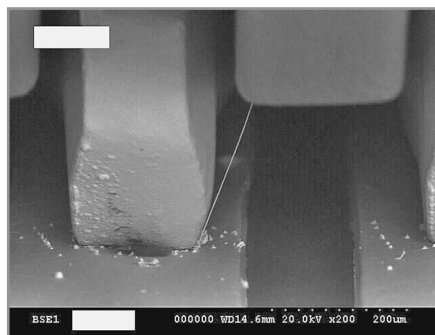


Рис. 7. «Ус», образовавшийся на оловянном покрытии бесштырькового коннектора

турные изменения и повреждения. Эта проблема в последние годы стала рассматриваться как составляющая часть надёжного проектирования.

Рост «усов»

Уже давно известно, что олово склонно к образованию нитевидных наростов, называемых «усами» (см. рис. 7). До недавнего времени при производстве печатных узлов на это явление почти не обращали внимания, но продолжающаяся миниатюризация электронных компонентов привела к уменьшению расстояния между проводящими дорожками до величин, сопоставимых с размерами «усов» – теперь промежуток между ними может составлять 100 нм и менее. Если «усы» на каждой из таких дорожек вырастут до 50 нм, может произойти короткое замыкание либо электрический пробой воздуха между соседними «усами». Как видно из таблицы 2, отказы из-за образования «усов» происходят в разных сферах применения электроники, в том числе на космических аппаратах и атомных электростанциях. Эти примеры показывают, какую опасность несёт в себе эффект формирования «усов» [17].

Уже предложено несколько моделей для описания роста «усов», однако так и не была доказана состоятельность ни одной из них. Предполагается, что «усы» растут из-за действия сжимающего напряжения. В оловянно-осно-

ванных ПС такие сжимающие напряжения могут возникать вследствие формирования интерметаллического слоя Cu-Sn на границах зёрен Sn – такие интерметаллиды образуются в результате диффузии меди из материала контактной площадки. Для продолжительного роста «усов» напряжения должны присутствовать на постоянной основе, т.е. длительное время без релаксации. Следовательно, любое внешнее приложение напряжений, или результирующие напряжения вследствие изменения объёма из-за формирования интерметаллидов, или те напряжения, которые образуются вследствие ЭМ, способствуют росту «усов».

До сих пор не существует единого «надёжного» решения проблемы формообразования «усов». Значительная часть трудностей возникает из-за неопределённости, где и когда они будут формироваться. Соответственно, становится трудно оценить эффективность решений, принятых для предотвращения роста «усов». Сейчас для тестирования роста «усов» за рубежом действует стандарт IEC 60068-2-82, который позволяет примерно оценить время до достижения «усами» критической длины (более 50 нм). Также необходимо отметить, что в настоящее время ведётся разработка аутентичного стандарта в формате ГОСТ Р МЭК 60068-2-82, который вступит в действие в 2017 г.

ПРОБЛЕМА ПОЛИМОРФИЗМА

Олово обладает полиморфизмом. Полиморфизм – это способность некоторых веществ в зависимости от внешних условий (например, температуры) образовывать различные кристаллические структуры (модификации). В результате полиморфного превращения атомы вещества перестраиваются из кристаллической решётки одного типа в кристаллическую решётку другого типа. Полиморфные модификации обозначают греческими буква-

ми α , β , γ , причём α соответствует самой низкотемпературной модификации.

Модификация β -Sn – тетрагональная объёмно-центрированная структура (решётка), стабильно существующая при температуре выше +13°C. При температуре ниже +13°C стабильна кубическая объёмно-центрированная структура – модификация α -Sn. Таким образом, олово, присутствующее в ПС, обычно имеет объёмно-центрированную тетрагональную структуру. Трансформация из одной структуры в другую происходит очень медленно, параметры процесса сильно зависят от чистоты металла. Если ПС подвергается крайне низким температурам в течение значительного времени (например, цепи холодного резервирования в аппаратуре космического аппарата), то происходит трансформации из β - в α -фазу, которая может вызывать значительное увеличение последней в объёме ПС (до 26–27%) [18]. Олово в α -фазе, называемое также «серым оловом», представляет собой чрезвычайно хрупкий материал, и такое увеличение его доли в объёме ПС вызывает обширное растрескивание и отслаивание (см. рис. 8).

Этот процесс может стать серьёзной проблемой надёжности для аэрокосмической отрасли и аппаратуры любого назначения, эксплуатируемой в экстремально холодных регионах, например, в приполярных областях. Однако решение найдено: для предотвращения трансформации необходимо ввести в олово не более 2% примесей таких, например, элементов, как висмут, сурьма или германий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведём краткие итоги:

- надёжность аппаратуры закладывается на стадии её проектирования, однако в России в настоящее время нет актуальной нормативно-технической базы для аналитической оценки параметров надёжности (усталостной долговечности) паяных соединений поверхностного монтажа;
- методы исследований и испытаний по определению и подтверждению надёжности ПС, применяемые сегодня и зафиксированные в соответствующих нормативно-технических документах, не позволяют создать полной и достоверной картины поведения ПС во всех возможных условиях эксплуатации содержащей их аппаратуры;

Таблица 2. Некоторые зарегистрированные случаи отказов из-за оловянных «усов»

Год	Объект	Место роста «усов»
2000	Космический аппарат Galaxy VII (полная потеря)	Реле
2000	Военная ракетная программа	Обкладка (выводы) чипа
2000	Модули управления питанием в промышленном оборудовании	Коннекторы
2000	Космический аппарат Solidaridad 1	Реле
2001	Атомная электростанция	Реле
2002	Самолётный GPS-передатчик	Обшивка радиочастотного модуля
2002	Атомная электростанция	Потенциометр
2003	Телекоммуникационное устройство	Обшивка радиочастотного модуля
2005	Космический аппарат Optus B1	Реле



Рис. 8. Левая часть оловянного бруска перешла в α -фазу, правая остаётся в β -фазе

• отсутствует возможность как спрогнозировать работу паяных соединений на этапе разработки, так и получить гарантированно правильные данные по их надёжности на этапе испытаний.

В данной статье, имеющей целью формирование общего представления о проблеме надёжности ПС, приведён, по возможности, полный обзор явлений, оказывающих на неё влияние – вне зависимости от наличия на сегодняшний день аналитического аппарата для их исследования и прогнозирования связанных с ними изменений надёжности ПС. Описаны также явления, специфичные для бессвинцовых ПС и не получившие пока широкого освещения в профильных русскоязычных изданиях.

В следующих статьях мы расскажем об основных моделях прогнозирования надёжности ПС, которые сформулированы, исходя из различного физического понимания процессов отказа, а также приведём примеры расчётов и проанализируем результаты. В заключение предложим путь развития надёжного проектирования для российской действительности, включая предложения по разработке Государственного стандарта.

ЛИТЕРАТУРА

1. IPC-SM-785 USA. Руководство по ускоренным испытаниям на надёжность паяных соединений поверхностного монтажа.
2. Engelmaier W. Wear-Out System Reliability with Multiple Components and Load Levels. Global SMT & Packaging. July 2008. Vol. 8. No. 7. Pp. 30–39.
3. IPC-D-279. Руководство по проектированию надёжных модулей на печатных платах, собираемых по технологии поверхностного монтажа.
4. Шавловский И.В., Иванов Н.Н., Ивин В.Д., Алексеев С.А. Оценка показателей надёжности паяных соединений при поверхностном монтаже. Сборник научных тру-

дов аспирантов, соискателей и студентов магистерской подготовки ОАО «Авангард». Выпуск 3. 2011. ОАО «Авангард». СПб. С. 242–249.

5. Иванов Н.Н., Ивин В.Д., Шавловский И.В., Дзюбаненко С.В., Ледовских И.А., Алексеев С.А., Глебо А.С., Петров Е.В., Фёдоров С.С. Комбинированная пайка компонентов BGA с бессвинцовыми шариковыми выводами. Сборник научных трудов аспирантов, соискателей и студентов магистерской подготовки ОАО «Авангард». Выпуск 2. 2010. ОАО «Авангард». СПб. Аграф+. С. 32–46.
6. Справочник «Надёжность электрорадиоизделий». РД В 319.01.20-98. Разработанный 22 ЦНИИ МО при участии РНИИ «Электронстандарт» и АО «Стандартэлектрон». Версия АСРН 2006.
7. Lau J.H. Solder Joint Reliability Theory and Applications. New York. Van Nostrand Reinhold. 1991.
8. Lead-Free Solders: Materials Reliability for Electronics Edited by K.N. Subramanian. 2012. John Wiley and Sons Ltd.
9. Тихомиров К., Алексеев С. Прогнозирование надёжности паяных соединений: факторы, приводящие к повреждениям. Электроника: наука, технология, бизнес. 2016. №6. С. 172–180.
10. Tu K.N. Solder Joint Technology: Materials, Properties, and Reliability. Springer Science Business Media. LLC. New York. 2007.
11. ГОСТ Р 56427-2015. Пайка электронных модулей радиоэлектронных средств. Автоматизированный смешанный и поверхностный монтаж с применением бессвинцовой и традиционной технологий. Технические требования к выполнению технологических операций.
12. Liang Yong (Hill), Mao Hank, Yan Yong Gang, Lee Jindong (King). Study on Solder Joint Reliability of Fine Pitch CSP. IPC APEX EXPO Conference Proceedings.
13. Soret C. Archives des Sciences Physiques et Naturelles. Geneve 3. 1879. P. 48–61.
14. Huang A.T., Gusak A.M., Tu K.N., Lai Y.S. Applied Physics Letters 88. 2006. 141911.
15. Chen Chih, Hsiao Hsiang-Yao, Chang Yuan-Wei, Ouyang Fanyi, Tu K.N. Thermomigration in Solder Joints. Materials Science and Engineering R 73. 2012. P. 85–100.
16. Dandu P., Fan X.J., Liu Y., Diao C. Finite Element Modeling on Electromigration of Solder Joints in Wafer Level Packages. Microelectronics Reliability 50. 2010. P. 547–555.
17. Dr. Henning Leidecker. NASA Goddard Jay Brusse. QSS Group, Inc. April. 2006.
18. A.S.G. Andrae Global Life Cycle Impact Assessments of Material Shifts. Springer-Verlag London Limited. 2010.



Компактные высоковольтные преобразователи напряжения



ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ И СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ

Технические параметры:

- Входные напряжения 5, 12, 24 В
- Выходные напряжения от 2 до 10 кВ
- Мощности от 2 мВт до 15 Вт
- Диапазон температур от –55 до +70°C
- Длительный ресурс

Применения:

- Медицинская диагностика
- Научное оборудование
- Авиационно-космическая техника

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР
ПРОДУКЦИИ XPR-EMCO

ProSoft®



Тел.: (495) 234-0636 • info@prosoft.ru • www.prosoft.ru