

УДК 621.791.3

*Н.Д. Сёмкин, Д.В. Кунтушев, И.А. Ксенофонтова***ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
МЕЖДУ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТОЙ И BGA-КОМПОНЕНТАМИ**

Проведен анализ микроструктуры паяных соединений BGA-компонентов. Изложены результаты ускоренных испытаний тестовых образцов по определению долговечности паяных соединений. Проведена оценка долговечности паяных соединений между печатной платой и компонентами в BGA-корпусах.

Ключевые слова: *паяное соединение, компоненты в BGA-корпусах, интерметаллическое соединение, распределение Вейбулла, модель Энгельмайера–Уайлда, надежность, циклические нагрузки, усталостная долговечность.*

Введение. Большинство применяемых компонентов в BGA-корпусах не имеют отечественных аналогов и поставляются в бессвинцовом исполнении, то есть их шариковые выводы не содержат свинца. Для монтажа таких компонентов на печатную плату можно применить три способа с получением разных по характеристикам паяных соединений: монтаж на свинцово-содержащую паяльную пасту; монтаж на свинцовосодержащую паяльную пасту; проведение реболлинга (замена бессвинцовых шариковых выводов на свинцовосодержащие) с последующим монтажом на свинцовосодержащую паяльную пасту [1].

Статистика качества и надёжности бессвинцовых и комбинированных (шариковые выводы, не содержащие свинца, припаяны на свинцовосодержащую пасту) паяных соединений мала, в то же время проведенные исследования показывают, что надежность бессвинцовой технологии уступает традиционной [3, 4], в связи с чем ее применение не рекомендуется в аппаратуре с требованиями к высокой надежности. Проведение реболлинга, как показано в [2], позволяет получить качество паяных соединений и интенсивность их отказов до момента воздействия усталостного разрушения аналогичные традиционной пайке. Усталостная долговечность паяных соединений между печатной платой и компонентами в BGA-корпусах мало исследована и требует детального изучения для применения BGA-компонентов в аппаратуре ответственного назначения с длительным сроком активного существования.

Цель работы — исследовать долговечность паяных соединений между контактными площадками печатной платы и компонентами в

BGA-корпусах, на которых перед монтажом была проведена замена бессвинцовых шариковых выводов на свинцовосодержащие и имеющих свинцовосодержащие выводы.

Теоретическая часть. Во время эксплуатации паяные соединения между компонентами в BGA-корпусах и печатной платой могут подвергаться следующим нагрузкам, приводящим к отказам:

- циклическое изменение температуры;
- вибрация;
- тепловой удар;
- механический удар.

Как правило, основным механизмом, определяющим надежность паяных соединений, является циклическое температурное расширение/сжатие, вызывающее усталостное разрушение. Устойчивость к разрушению, вызванному вибрацией, тепловым ударом и механическим ударом зависит в основном от прочности паяного соединения. Устойчивость к разрушению от усталости из-за циклического воздействия температуры зависит от различия температурного расширения подложки BGA-компонента, печатной платы и припоя (выводов BGA-компонента).

Для прогнозирования долговечности паяных соединений в заданных условиях эксплуатации необходимо проведение ускоренных испытаний на усталостное разрушение и определение показателей надежности.

При этом следует учесть, что усталостные разрушения, полученные при ускоренных испытаниях, не эквивалентны наблюдающимся при эксплуатации. Чтобы воспользоваться результатами ускоренных испытаний для определения показателей надежности, необходимо применить преобразование ускорения. То есть требуется

выполнить обоснованное сравнение результатов, полученных в различных условиях ускоренных испытаний, и, что более важно, экстраполировать результаты этих ускоренных испытаний для прогнозирования надежности изделия при его эксплуатации [5].

Надежность паяных соединений определяется по их износу. На рисунке 1 показаны отдельные «U-образные» графики надежности для паяных соединений и для «типичного» незакрепленного электронного компонента. Долговечность паяного соединения характеризуется главным образом правой восходящей частью кривой, где интенсивность отказов со временем быстро возрастает вследствие износа. Из этого следует непосредственный вывод, что качество производства не может повысить собственную надежность конструкции в данных условиях эксплуатации; однако, недостаточное качество производства может понизить заложенную при проектировании собственную надежность за счет возрастания интенсивности ранних отказов [5].

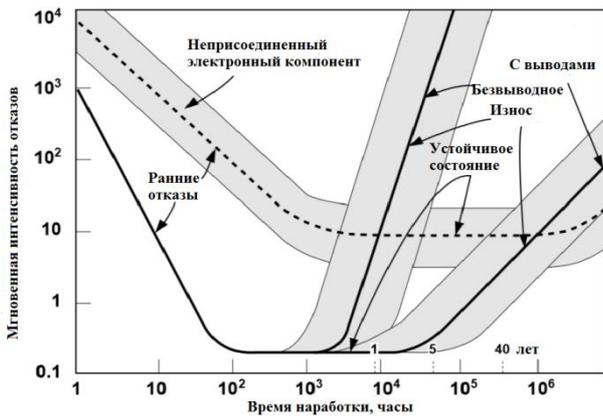


Рисунок 1 — Сравнение «U-образных» характеристик надежности электронных компонентов и паяных соединений поверхностного монтажа [5]

Области «раннего отказа», «устойчивого состояния» и «износа» определяются по тому, какой из этих трех режимов преобладает. Точки пересечения кривой на рисунке 1 очерчивают протяженность этих областей.

За исключением областей износа для паяных соединений, отображенные на графике значения являются достаточно «расплывчатыми». Отсутствует достаточное количество точных данных об областях «раннего отказа» и «устойчивого состояния» как для компонента, так и для паяного соединения. Область «устойчивого состояния» для компонентов в значительной степени зависит от сложности компонента. [5] Паяные соединения микросхем в BGA-корпусах с печатной платой с увеличением количества выводов выходят из строя с более высокой интенсивно-

стью. Области «раннего отказа» и «устойчивого состояния» для таких паяных соединений меньше, чем, например, для чип-компонентов, и их динамика изменения интенсивности отказов в большей степени определяется областью «износа».

Следует отметить, что в общем случае для паяных соединений области «ранних отказов» и «устойчивого состояния» являются несущественными, поскольку вероятности отказа слишком малы даже при допущении на порядок большей величины ошибок.

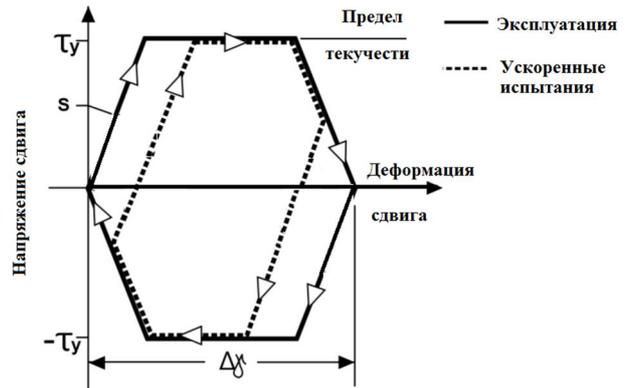


Рисунок 2 — Накопленное усталостное повреждение [5]

Преобладающим механизмом разрушения при термоциклировании является усталость из-за ползучести, усиленная релаксацией напряжений. На рисунке 2 показано стилизованное изображение энергии вязко-пластической деформации, пропорционально представленной площадью циклических петель гистерезиса на графике в координатах напряжение — деформация в одном цикле изменения температуры. Энергия вязко-пластической деформации вызывает усталостное разрушение, которое накапливается от цикла к циклу. С приложением нагрузки, начиная от нулевых значений напряжений, при незначительных деформациях паяное соединение сначала претерпевает упругую деформацию, сопровождаемую пластическим течением, если нагрузка распространяется за предел текучести припоя. Следует отметить, однако, что для припоя не существует ни истинно упругой деформации, ни предела текучести, определяемых в реальном физическом смысле. Линии «Упругая деформация» — «Текучесть» являются упрощенной линеаризацией нелинейной зависимости напряжение — деформация, которая сильно зависит от температуры, скорости изменения температуры, состава припоя и его кристаллической структуры. Кроме того, предел текучести — это искусственный параметр, определяемый в инженерных целях; его определение для припоя в

равной степени сильно зависит от нескольких переменных, некоторые из которых контролируются (например, температура), а другие — нет (например, кристаллическая структура).

За участком упруго-пластического течения на нагрузочной кривой следует обусловленная релаксацией напряжений/ползучестью реакция паяного соединения, зависящая от температуры и уровня напряжений. За достаточный период времени, который может длиться от минут при высоких температурах до дней при пониженных температурах, напряжения в паяных соединениях в основном полностью релаксируют, вызывая максимально возможную остаточную пластическую деформацию. Выдержка сверх этого времени не вызовет дополнительного усталостного разрушения; однако при повышенных температурах в припое продолжается разрушительный рост зерен.

Основным осложнением в механизме разрушения является тот факт, что во многих случаях и, по определению, во время всех ускоренных испытаний периоды выдержки недостаточно продолжительны для полной релаксации напряжений. Этот эффект показан на рисунке 2 петлями гистерезиса с отметкой «ускоренные испытания», для которых площадь петли значительно меньше соответствующих площадей для условий, допускающих полную релаксацию напряжений. Это указывает на значительно меньшее усталостное разрушение за один цикл такого ускоренного циклического режима. Как следствие, количество циклов при ускоренном испытании не может быть прямо сопоставлено с количеством эксплуатационных циклов.

Следует отметить, что показанная на рисунке 2 симметричность петель гистерезиса возможна лишь в случае, когда периоды выдержки при низкой температуре значительно превышают по длительности периоды выдержки при высокой температуре; однако симметрия является характерным явлением для изотермических циклических испытаний с механическим приложением нагрузок.

Описанное на рисунке 2 поведение паяных соединений характерно для циклических воздействий температуры при значениях выше минус 20 °С. Область температур от минус 20 до плюс 20 °С является границей, характеризующей поведение припоя под нагрузкой, которое при повышенных температурах определяется преимущественно ползучестью/релаксацией напряжений, а при пониженных температурах преимущественно прилагаемым усилием.

По мере накопления усталостных повреждений размер зерен в паяных соединениях увели-

чивается. После того, как от 25 до 50 % срока службы паяных соединений до разрушения израсходовано, на пересечениях межзеренных границ формируются микропустоты или раковины. Эти микропустоты превращаются в микротрещины, которые по мере накопления усталостных повреждений растут и объединяются в макротрещины.

Для паяных соединений с неоднородным распределением напряжений и деформаций, в частности с зубчатыми выступами, для разрушения достаточно единственной крупной трещины. Для паяных соединений с однородным распределением напряжений и деформаций, например цилиндрических, образуется множество трещин, одна из которых в итоге приведет к разрушению паяного соединения [5].

Предварительная оценка долговечности. Для прогнозирования надежности паяных соединений в течение длительного времени применяется модель Энгельмайера – Уайлда с использованием распределения Вейбулла в соответствии с [5] и заключается получение более 50 % отказов ПС каждого типа.

Исходными выбраны следующие данные:

— исследуемый образец — компонент *LBGA1225T1.27* и *LBGA144*;

— циклическое изменение температуры эксплуатации находится в пределах от плюс 10 до плюс 70 °С;

— длительность одного цикла составляет 90 мин.

В связи с тем, что отказов паяных соединений между печатной платой и компонентом *LBGA144* за время испытаний не наблюдалось (см. экспериментальные исследования), ниже приведена предварительная оценка долговечности только для паяных соединений *LBGA1225T1.27*.

Порядок расчета усталостной долговечности паяных соединений начинается с определения показателя усталостной пластичности, значение которого составило:

$$c = -0,442 - 6 \cdot 10^{-4} T_{Sj} + 1,74 \cdot 10^{-2} \ln \left(1 + \frac{360}{T_D} \right) = -0,427768$$

где $T_{Sj} = 40$ °С — средняя циклическая температура паяного соединения, определяемая как

$$\frac{1}{4} (T_C + T_S + T_{C,0} + T_{S,0});$$

T_C , T_S — устанавливаемая рабочая температура компонента и подложки во время выдержки при высокой температуре;

$T_{C,0}$, $T_{S,0}$ — установившаяся рабочая температура для компонента и подложки во время выдержки при низкой температуре для нерабочих полупериодов (питание отключено);

T_D — полупериод временного цикла в минутах (в нашем случае он составляет 45 мин).

Следующим шагом необходимо рассчитать циклические усталостные повреждения (ΔD):

$$\Delta D_{\text{прогноз}} = \frac{FL_D \Delta \alpha \Delta T_e}{h} = 0,004875,$$

где $F = 1$ — эмпирический фактор «неидеальности», показывающий отклонения реальных паяных соединений от идеализированной математической модели и учитывающий вторичные и часто трудноописываемые эффекты, такие как коробление, хрупкие интерметаллические соединения, богатые свинцом приграничные слои и различия в расширениях материалов на границе припоя и др., для безвыводных паяных соединений имеет значение от 0,7 до 1,2;

$L_D = 30,47$ мм — максимальное расстояние между паяными соединениями в компоненте, измеряемое от центра компонента (нейтральной точки) до края вывода;

$\Delta \alpha = \alpha_S - \alpha_C = 0,0000021$ $1/^\circ\text{C}$ — абсолютная разница в коэффициентах теплового расширения платы и компонента;

$$\Delta T_e = \frac{\alpha_S \Delta T_S - \alpha_C \Delta T_C}{\Delta \alpha} = \frac{40(0,00018 - 0,000016)}{0,000002} = 40 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{— эквива-}$$

лентная амплитуда циклических колебаний температуры, вызывающая диссипацию энергии в компоненте, а также колебания внешней температуры компонента;

$h = 0,5$ мм — высота паяного соединения.

Количество циклов до наработки на отказ 50 % паяных соединений может быть спрогнозировано следующим образом:

$$N_f(50\%)_{\text{прогноз}} = \frac{1}{2} \left[\frac{2\varepsilon'_f}{\Delta D_{\text{прогноз}}} \right]^{-\frac{1}{c}} = 4639,$$

где $\varepsilon'_f = 0,325$ — коэффициент усталостного повреждения.

Экспериментальные исследования. Ускоренным испытаниям по определению долговечности подверглись паяные соединения, полученные в парофазной печи с применением жидкости с температурой кипения $230 \text{ } ^\circ\text{C}$ по термопрофилю, показанному на рисунке 3. В качестве исследуемых образцов для формирования паяных соединений применялись микросхемы

$LBGA1225T1.27$ и $LBGA144$. На микросхемах $LBGA144$ перед монтажом был проведен реболлинг (замена бессвинцовых шариковых выводов на свинцовосодержащие $Sn63Pb37$) с целью увеличения надежности паяных соединений. $LBGA1225T1.27$ имели свинцовосодержащие шариковые выводы.

При анализе паяных соединений с помощью рентгена перемыканий шариковых выводов не обнаружено. Форма паяных соединений соответствует оптимальной сферической (рисунок 4).

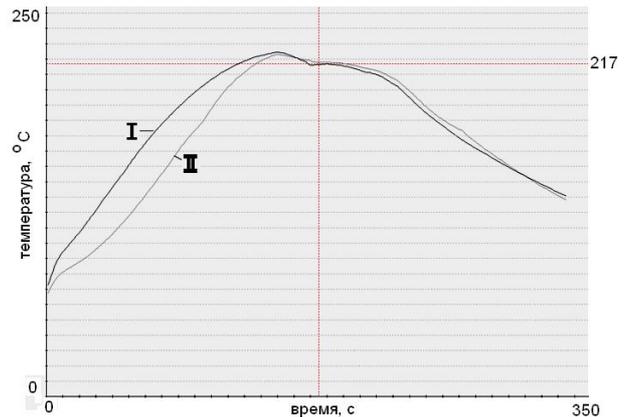


Рисунок 3 — Термопрофиль пайки:
I — изменение температуры печатной платы;
II — изменение температуры корпуса микросхемы

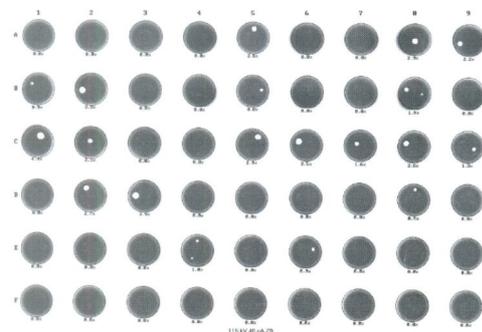


Рисунок 4 — Результаты рентгеноконтроля $LBGA1225T1.27$

Анализ микрошлифов паяных соединений между печатной платой и $LBGA1225T1.27$ (рисунок 5) показал:

— наличие интерметаллического слоя толщиной не более 15 мкм;

— в процессе пайки происходит растворение поверхностного слоя меди контактных площадок печатной платы и образование интерметаллических зерен ближе к центру паяных соединений.

Анализ микрошлифов паяных соединений между печатной платой и $LBGA144$ (рисунок 6) показывает наличие интерметаллического слоя олово-медь на нижней границе паяного соединения толщиной порядка 10 мкм, практически

полное растворение барьерного подслоя никеля в припое шарикового вывода на верхней границе паяного соединения и, как следствие, наличие интерметаллического слоя олово-никель и олово-медь порядка 10 мкм. Наличие интерметаллических соединений в микрошлифах исследуемых образцов вызвано повышенной температурой пайки, слишком длительным нахождением припоя в расплавленном состоянии и температурными воздействиями в процессе реболинга, что совпадает с результатами работ.

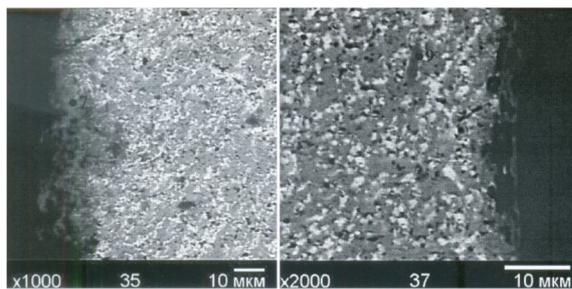


Рисунок 5 — Микрошлифы паяных соединений *LBGAI225T1.27*: слева — нижняя граница, справа — верхняя граница

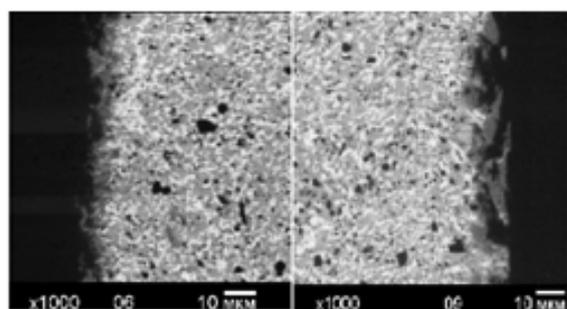


Рисунок 6 — Микрошлифы паяных соединений *LBGAI144*: слева — нижняя граница, справа — верхняя граница

Объекты исследования были подвергнуты испытаниям на механические воздействия и термоциклирование.

При проведении испытаний на механические воздействия электронные узлы с образцами испытаний были собраны в электронный блок. Электронный блок подвергся следующим испытаниям: вибрационные воздействия; линейное ускорение; ударное воздействие в соответствии с ГОСТ РВ 20.57.416-98. По окончании испытаний на прочность при механических воздействиях были проведены: визуальный контроль, измерение сопротивления тестовых цепей. В результате образования трещин в паяных соединениях не обнаружено.

После электронные узлы были установлены в климатическую камеру и подключены к детектору событий. Детектор событий, подключенный к электронным узлам, был настроен для выявле-

ния отказов паяных соединений. Испытания проводились при следующих условиях: температурный диапазон от 0 до плюс 100 °С; время выдержки 15 минут при минимальном и максимальном значениях температур. Во время испытаний детектор событий последовательно фиксировал первые признаки повышения сопротивления в электрических цепях, переходящие затем в устойчивые отказы. Испытания на термоциклирование были остановлены при получении 50 % отказов паяных соединений между печатной платой и *LBGAI225T1.27*. Отказов паяных соединений между печатной платой и компонентом *LBGAI144* за время испытаний не наблюдалось. По окончании испытаний были определены места и причины выявленных отказов паяных соединений путем изготовления микрошлифов и проведения их анализа.

Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1

№ от-каза	Цикл фиксации отказа	Процент отказа
1	1000	3 %
2	1500	6 %
3	1700	9 %
4	1800	13 %
5	2700	16 %
6	2900	19 %
7	3000	22 %
8	3100	25 %
9	3200	28 %
10	3300	31 %
11		34 %
12	3500	38 %
13		41 %
14	3500	44 %
15		47 %
16	3700	50 %
17		53 %
18	3900	56 %
19	4300	59 %

Анализ результатов испытаний. В результате проведения испытаний на медленные изменения температуры окружающей среды в течение 3700 циклов было зафиксировано 17 отказов паяных соединений между печатной платой и *LBGAI225T1.27*, что согласно модели Энгельмайера – Уайлда говорит о достижении порога испытательных циклов при вероятности отказа более 50 %.

На основании полученной статистики отказов паяных соединений можно определить параметр β — наклон участка вероятности Вейбулла.

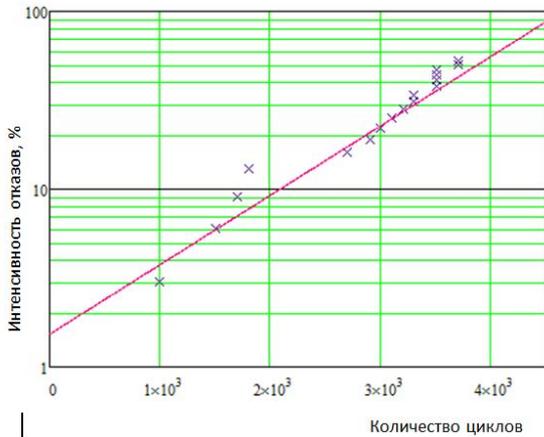


Рисунок 7 — Статистика отказов паяных соединений

Графически был определен (рисунок 7) параметр β , и его значение составило 2. Средняя циклическая температура во время испытаний составила $T_{SJ} = \frac{T_C + T_S + T_{C,0} + T_{S,0}}{4} = 50$ °С, эквивалентная температура

$$\Delta T_e = \frac{\alpha_S \Delta T_S - \alpha_C \Delta T_C}{\Delta \alpha} = 100 \text{ °С. Тогда}$$

$$c = -0,442 - 6 \cdot 10^{-4} T_{SJ} + 1,74 \cdot 10^{-2} \ln \left(1 + \frac{360}{T_D} \right) = -0,415992.$$

Факторы ускорения испытаний относительно условий эксплуатации можно рассчитать на основе количества циклов, и его значение составило:

$$K_{ускор} = \frac{N_f(50\%)_{прогноз}}{N_f(50\%)_{исп}} = 12,537936.$$

Тогда для паяных соединений между печатной платой и *LBGA1225T1.27* количество циклов при эксплуатации до получения $x\%$ отказов можно вычислить следующим образом:

$$N_f(x\%) = (N_f(50\%) * K_{ускор}) \left[\frac{\ln(1 - 0,01 \cdot x)}{\ln(0,5)} \right]^{\frac{1}{\beta_{исп}}} =$$

$$= 3700 \cdot 12,54 \left[\frac{\ln(1 - 0,01 \cdot x)}{\ln(0,5)} \right]^{\frac{1}{2}} = 46398 \cdot \left[\frac{\ln(1 - 0,01 \cdot x)}{\ln(0,5)} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

В связи с тем, что отказов паяных соединений между печатной платой и компонентом *LBGA144* за время испытаний не наблюдалось, их интенсивность отказов при расчётах надёжности аппаратуры предлагается выбирать в соответствии с установленной в [2].

Заключение. В статье показано, что прогнозирование усталостной долговечности паяных соединений на основе модели Энгельмайера – Уайлда, учитывающей физический размер компонента, тип соединения, высоту и площадь, жесткость вывода, несовпадение коэффициентов температурного расширения, с использованием распределения Вейбулла позволяет математически оценить вклад каждого компонента в надёжность электронного модуля и выявить те компоненты, которые ее снижают в большей степени.

Библиографический список

1. Кунтушев Д.В., Зиятдинова Е.Р. Проблемы технологии монтажа микросхем в корпусах ВГА для аппаратуры с требованиями к высокой надёжности // Материалы научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева», посвященной 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина, ОАО «ИСС», Железногорск, 2011. С. 107-108.
2. Кунтушев Д.В., Кунтушев А.В., Иванов А.В., Пахомов А.С. Исследование процесса образования интерметаллических соединений Cu_3Sn и Cu_6Sn_5 и их влияния на надёжность электронных узлов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 48. С. 119-125.
3. Новоттник М. Надёжность бессвинцовых электронных узлов // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 1.
4. Clech J.P. Lead-Free and Mixed Assembly Solder Joint Reliability Trends. APPEX SMEMA Council Designer Summit. 2004.
5. IPC-SM-785 Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments, November, 1992.