



ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Павел Масич, Александр Попроцкий
info@ostec-smt.ru

В настоящее время в международных стандартах огромное внимание уделяется влиянию скорости термоциклирования на жизнеспособность паяных соединений печатных узлов. В данной статье описываются результаты исследований паяных соединений BGA и QFP корпусов микросхем, подвергавшихся воздействию циклического изменения температуры при различных скоростях.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции в электронике характеризуются, прежде всего, технологиями поверхностного монтажа высокой плотности и миниатюрными электронными компонентами высокой интеграции с большим объемом функциональных возможностей. В последние годы расширение функциональности электронных устройств привело к росту величины тепловых воздействий внутри изделий. Кроме того, к внутренним тепловым воздействиям добавляются внешние факторы. Соответственно, в этих условиях очень важно получение достоверных результатов, связанных с термической усталостью соединений электронных изделий.

Усложнение конструкций изделий приводит к возникновению более сложных механизмов термической усталости паяных соединений. Исследование этих механизмов важно для получения большей достоверности результатов исследований жизнеспособности паяных соединений с обеспечением их повторяемости.

Испытания термоциклированием приводят к развитию термической усталости в паяных соединениях. К факторам, которые являются ускоряющими в данном процессе, относятся предельные значения отрицательной и положительной температуры, скорость изменения температуры и время выдержки при отрицательных и положительных температурах. В соответствии со стандартом IEC60749-25 Temperature Cycling (JESD22-A104-B) общепринятая скорость термоциклирования, при которой проводятся испытания на надежность печатных узлов, от 10 до 15°C в мин.

В данной статье приведены некоторые результаты исследований паяных соединений печатных узлов, подвергшихся воздействию циклических изменений температуры.

2. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

2.1. Экспериментальные образцы

В качестве экспериментальных образцов использовались микросхемы в BGA (Ball Grid Array) и QFP (Quad Flat Package) корпусах с боль-

шим количеством выводов небольших размеров, установленные на печатные платы. На рис. 1 показан экспериментальный печатный узел, а в таблице 1 приведены характеристики использованных материалов и комплектующих. В исследованиях применялось два типа припоев Sn-37Pb и Sn-3.0Ag-0.5Cu (численные значения перед символом химического элемента обозначают его массовую долю в процентах).

Таблица 1 Типы припоев и монтируемых компонентов

Тип припоя	Sn-3.0Ag-0.5Cu, Sn -37Pb (mass%)
Тип корпусов	BGA: 196-pin, 1.0 pitch, 15 mm sq; QFP: 208-pin, 0.5 pitch, 28 mm sq
Печатная плата	100mm x 140mm x 1.6mm, FR-4 (Cu + pre-flux)

2-2 Условия испытаний

На рис. 2 приведены условия испытаний. Время выдержки принято стандартное - 10 минут. Скорость изменения температуры выбрана 6,15 и 35 градусов в минуту. Наиболее эффективные воздействия



Рис. 2 Условия испытаний

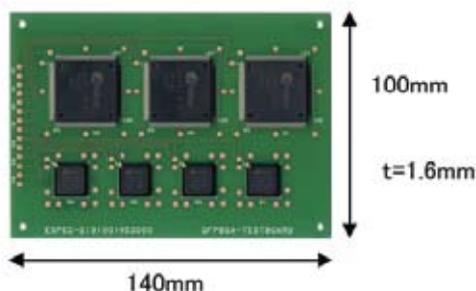


Рис. 1 Внешний вид экспериментального печатного узла



Рис. 3 Серия камер термоциклирования TSA

Таблица 2 Описание серии камер термоциклирования TSA

Модель	Диапазон температур	Размеры рабочей зоны, ШхВхГ, мм
TSA-71H		410 x 460 x 370
TSA-71S	Зона тепла: от +60 до +200°C	
TSA-101S	Зона холода: от -70 до 0°C	650 x 460 x 370
TSA-201S		650 x 460 x 670
TSA-41L		240 x 460 x 370
TSA-71L	Зона тепла: от +60 до +200°C	410 x 460 x 370
TSA-101L	Зона холода: от -65 до 0°C	650 x 460 x 370
TSA-301L		970 x 460 x 670

реализуются при скоростях от 30 до 40 градусов в минуту. В данных исследованиях использовалась скорость 35 градусов в минуту. В Японии, например, скорость изменения температуры 35 градусов в минуту - стандартные условия испытаний для исследования надежности микросхем в BGA и QFP-корпусах. Для испытаний использовалась камера термоциклирования типа воздух-воздух модели ESPEC (TABAI) TSA-101 (рис. 3), в которой применяется зона с температурой окружающей среды для предварительной выдержки образца перед холодной и горячей зонами.



Рис. 4 Камера термоциклирования TCC-150W

Скорость изменения температуры 15 градусов Цельсия в минуту определена стандартом JEDEC (США) JESD22-A104-B (IEC60749-25). В зависимости от теплоемкости образца допускается выбор наиболее подходящих значений в диапазоне между 10 и 15 градусами в минуту. Для испытаний при этой скорости использовалась камера ESPEC (TABAI) TCC-150 (рис. 4), в которой не используется предварительная выдержка испытываемого образца при температуре окружающей среды перед холодной и горячей зонами. Для испытаний при скорости 6 градусов в минуту использовалась камера термоциклирования ESPEC (TABAI) HC-120 (рис. 5). В последних двух вариантах (6 и 15 градусов Цельсия в минуту), как показано на рис. 6, профиль изменения температуры (нагрев-охлаждение) имеет симметричный трапецевидный характер. Вариант со скоростью термоциклирования 35 градусов Цельсия в



Рис. 5 Камера термоциклирования HC-120

Таблица 3 Описание камеры термоциклирования TCC-150W

Модель	Диапазон температур	Размеры рабочей зоны, ШхВхГ, мм
TCC-150W	От -70 до +180°C	800 x 500 x 400

Таблица 4 Описание камеры термоциклирования HC-120

Модель	Диапазон температур	Размеры рабочей зоны, ШхВхГ, мм
HC-120	От -70 до +150°C	380 x 100 x 320

минуту имеет профиль, характерный для камер термоциклирования. Значения температуры на образце фиксировались в центре печатной платы. В таблице 5 представлены данные по скорости изменения температуры и времени выдержки. Описание методов задания скорости термоциклирования и времени выдержки изложено в стандарте JESD22-A104-B.

Изменение состояния паяных соединений проверялось путем измерения электрического сопротивления в соединительных цепях BGA каждые три минуты. По изменению величины сопротивления определялся момент разрушения. Кроме того, для QFP-корпусов проводились исследования на растяжение паяных соединений. После испытаний на термоциклирование производилось микрошлифование, полировка и оценка BGA- и QFP-корпусов на SEM-микроскопе (композиционное изображение) и анализ формы разрушений.

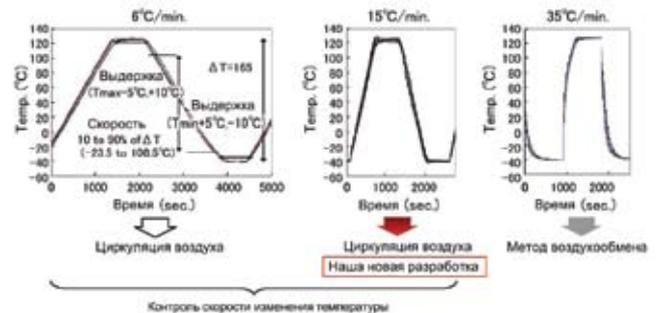


Рис. 6 Профиль изменения температуры

Таблица 5 Описание условий испытаний

Задаваемые параметры	Заданная скорость изменения температуры		
	6°C /min.	15°C /min.	35°C /min.
Скорость изменения температуры (°C /min.) -40 to 125°C	5.8-6.3	14.1-15.5	36.0-39.6
Скорость изменения температуры (°C /min.) 125 to -40°C	5.8-6.3	14.5-15.3	28.7-35.3
Время выдержки (min.) 120 to 135°C	8.9-12.5	8.9-11.5	10.1-10.7
Время выдержки (min.) -35 to 50°C	9.7-10.8	10.3-11.4	10.6-11.6

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

3-1 Оценка времени разрушений для BGA корпусов

Момент разрушения определялся достижением двойного начального сопротивления при определенном количестве циклов. Масштабный параметр был установлен как средняя жизнь по Вейбуллу. На рис. 7 представлены результаты с указаниями M-значений. Результаты сравнения момента разрушения паяного соединения для различных скоростей изменения температуры при термоциклировании приведены на рис. 8. Припой Sn-37Pb демонстрирует примерно

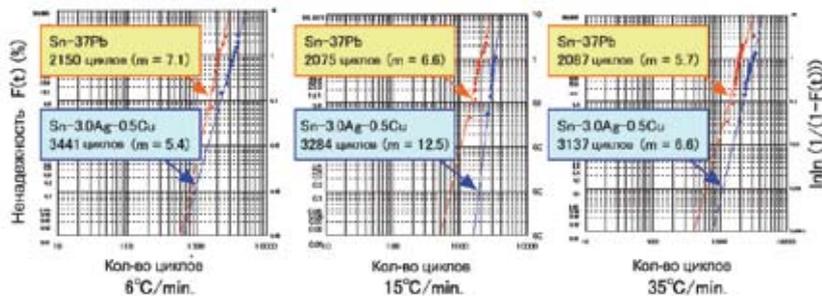


Рис. 7 Результаты анализа момента разрушений по Вейбуллу для BGA корпусов (-40./+125.)

одинаковые числа циклов до разрушения паяных соединений при различных скоростях изменениях температуры. Для припоя Sn-3.0Ag-0.5Cu при более высоких скоростях термоциклирования разрушение наступает при меньшем количестве циклов. Различие составляет примерно 10% для скоростей изменения температуры 6 и 35 градусов Цельсия в минуту.

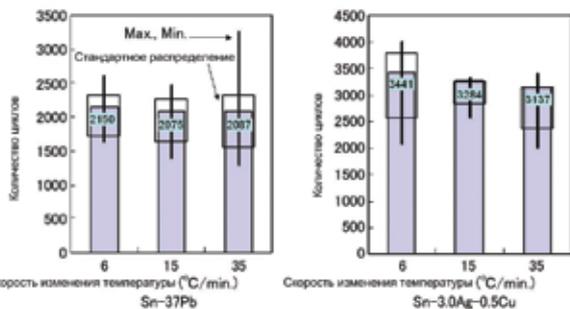


Рис. 8 Результаты сравнения момента разрушения паяного соединения для различных скоростей изменения температуры при термоциклировании

3-2 Форма разрушения припоя Sn-37Pb

3-2-1 Результаты исследований выводов BGA

На схематичных изображениях BGA-микросхем обозначены выводы, где зафиксировано наибольшее повреждение паяных соединений шариковых выводов при термоциклировании. На рис. 9 показано положение этих выводов. Разрушение конкретных паяных соединений определялось по изменению сопротивления в каждой цепи. На рис. 10 показаны результаты исследований для припоя Sn-37Pb после 2000 циклов для каждой скорости изменения температуры. Результаты визуального контроля подтвердили место разрушения и его вид. Следует отметить, что при различных скоростях изменения

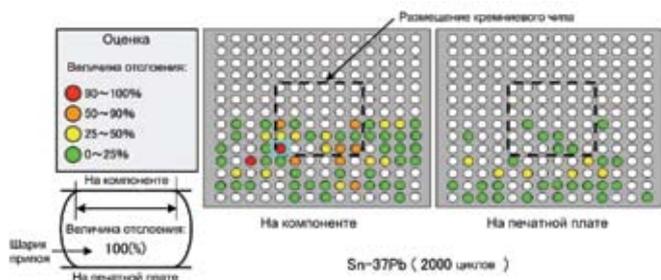


Рис. 9 Анализ разрушений (-40./+125.)

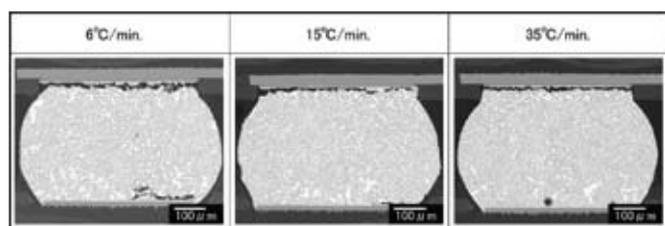


Рис. 10 Результаты осмотра на микроскопе (Sn-37Pb, 2000 cycles, -40./+125.)

температуры не было выявлено различий в форме разрушений.

Температурное воздействие и воздействие давлением вызывает образование зерен свинца в припое Sn-37Pb. При проведении исследований было сделано предположение, что более низкая скорость изменения температуры, как условие испытаний, увеличивает эффект воздействия тепла на рост зерен. В то же время эффект воздействия давлением, возникающий в результате геометрических изменений образца под воздействием температуры, сосредотачивается на углах шариковых выводов. Вследствие этого сравнивались средние диаметры зерен свинца в центре и в углах шариковых соединений.

Рис. 11 описывает метод определения среднего диаметра зерен. От четырех точек в углах линии рисуются к центру, средний диаметр зерен свинца определяется индивидуально для каждой линии. Аналогичный метод был использован для припоя Sn-3.0Ag-0.5Cu с измерением диаметра зерен Ag₃Sn. На рис. 12 изображена диаграмма сравнения диаметра зерен в центре и в углах по краям на линии с самым большим размером частиц.

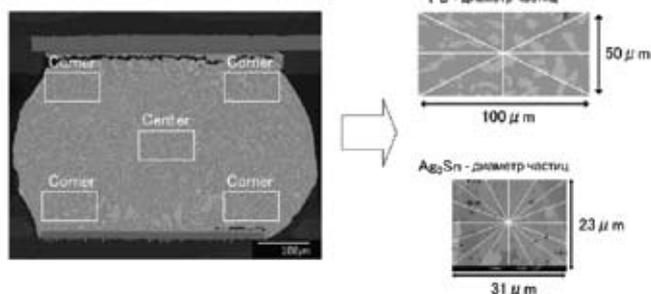


Рис. 11 Методика измерения средних диаметров зерен

Рис. 11 и 12 демонстрируют, что при более низкой скорости термоциклирования происходит увеличение диаметра зерен в центральной области. Можно предположить, что больший размер зерен является результатом увеличения продолжительности времени, требующегося для каждого цикла при условии уменьшения скорости изменения температуры. Т.е. краевые области шариковых выводов в большей степени подвергаются тепловому и механическому воздействию.

3-2-2 Форма разрушения для Sn-3.0Ag-0.5Cu припоя

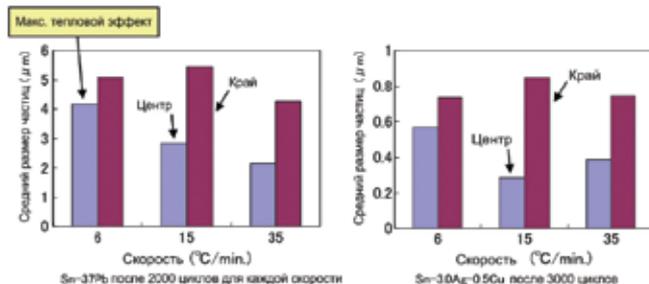


Рис. 12 Результаты измерений среднего диаметра зерен (-40./+125.)

В ходе исследований оценивались места соединений площадок выводов BGA-микросхем с шариками припоя Sn-3.0Ag-0.5Cu после 3000 циклов при всех скоростях изменения температуры. Рис. 13 иллюстрирует результаты. При скоростях изменения температуры 6 и 15 градусов Цельсия в минуту растрескивание начинается с разрывом припоя и затем продолжается с видимым сползанием между основанием микросхемы и шариковым выводом. При 35 градусах Цельсия в минуту наблюдалось только растрескивание припоя. Это объясняется тем, что при более низкой скорости изменения температуры реализуется большее время выдержки при высокой температуре. Это приводит к прогрессу в реакции металла, проявляющегося в сползании шарикового вывода.

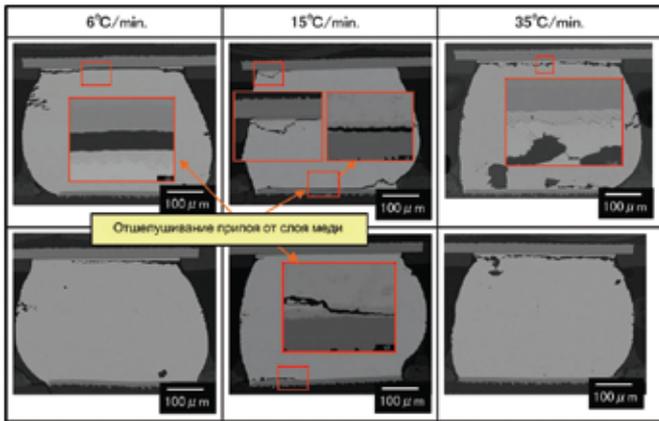


Рис. 13 Результаты визуального анализа мест разрушения шариковых паяных выводов на основе припоя Sn-3.0Ag-0.5Cu, 3000 циклов (-40./+125.)

Таким образом, полученные результаты позволяют прогнозировать виды разрушений при различных скоростях термоциклирования. 3-3 Результаты испытаний на растяжение паяных соединений QFP корпусов На рис. 14 проиллюстрированы результаты испытаний на сопротивление разрыву паяных соединений микросхем в корпусах QFP. Испытания проводились при скоростях растяжений 10 мм в минуту.

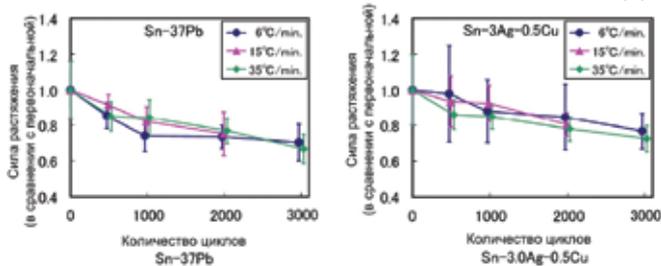


Рис. 14 Результаты испытаний паяных соединений микросхем в QFP на сопротивление разрыву (-40./+125.)

3-4 Результаты исследований мест разрушений паяных соединений QFP корпусов

Рис. 15 и 16 иллюстрируют результаты исследований соединений выводов микросхем QFP, паяных припоями Sn-37Pb и Sn-3.0Ag-0.5Cu после 3000 циклов при каждой скорости изменения температуры. Как показано на рис. 15 в припое Sn-37Pb наблюдается тенденция растрескивания в галтели. Существенные отличия в характере или внешнем виде разрушений могут быть связаны с различием в скоростях изменения температуры.

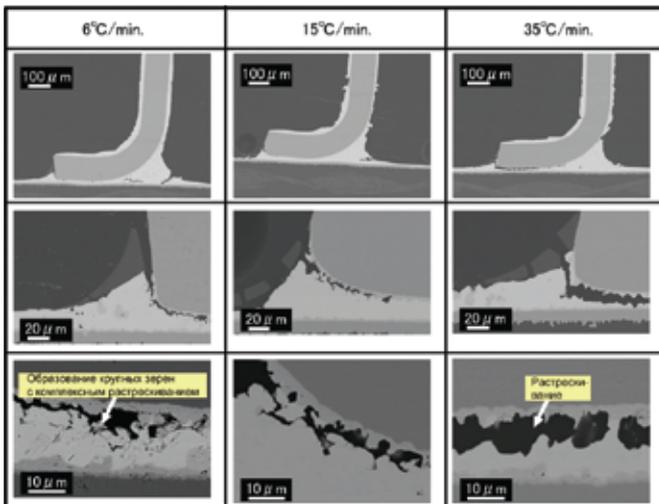


Рис. 15 Результаты исследований мест разрушений паяных соединений QFP корпусов (Sn-37Pb, 3000 циклов (-40./+125.)

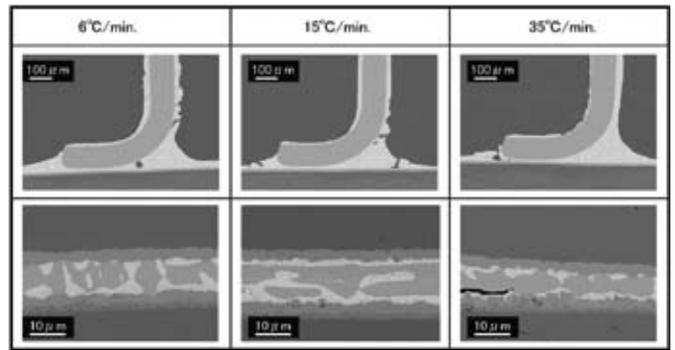


Рис. 16 Результаты исследований мест разрушений паяных соединений QFP-корпусов (Sn-3.0Ag-0.5Cu, 3000 циклов (-40./+125.)

На рис. 16 представлено растрескивание Sn-3.0Ag-0.5Cu припоя. Сравнение растрескавшихся соединений показывает очевидную границу между зернами при 6 и 15 градусах Цельсия в минуту с очевидным разрушением на границах зерен. При 35 градусах в минуту увеличение растрескивания зависит от формы границы между зернами. Однако в этом случае не очевидна граница разрушения между зернами, как это наблюдается при 6 и 15 градусах Цельсия в минуту. Это доказательство ведет нас к заключению, что пониженная скорость изменения температуры больше воздействует на усталость паяных соединений. При 6 градусах Цельсия в минуту замечено образование эффекта Киркендала (*1). Таким образом, получение одинаковых результатов при исследованиях QFP и BGA-микросхем объясняется тем, что при 6 градусах Цельсия в минуту обеспечивается более продолжительное время экспозиции при высокой температуре.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты исследований воздействия термоциклирования на паяные соединения смонтированных узлов и, соответственно, характер разрушений соединений, выполненных с применением Sn-37Pb и Sn-3.0Ag-0.5Cu припоев. В процессе исследований получены следующие результаты:

- 1 момент разрушения паяных соединений для BGA-корпусов приблизительно одинаков при всех скоростях термоциклирования (6, 15 и 35 градусов Цельсия в минуту). Однако для припоя Sn-3.0Ag-0.5Cu наблюдалось небольшое отличие;
- 2 разрушения паяных соединений BGA на основе припоя Sn-37Pb практически не имеют различий в форме растрескивания при различных скоростях термоциклирования. Но при более низкой скорости разрушений отмечается больший рост зерен свинца. Для паяных соединений с припоем Sn-3.0Ag-0.5Cu повреждения при более низких скоростях термоциклирования 6 и 15 градусов Цельсия в минуту являются сочетанием растрескивания припоя и отслаивания галтели от контактной площадки на подложке;
- 3 при исследовании разрушений QFP-корпусов обнаружено, что Sn-37Pb припой не демонстрирует различий в характере растрескивания при различных скоростях термоциклирования. Но для соединений на основе припоя Sn-3.0Ag-0.5Cu установлено, что пониженная температура термоциклирования вызывает разрушение, на границах зерен. В то же время, более высокая скорость термоциклирования усиливает растрескивание в местах их образования.

По материалам Technology Report №25, 2007, Espec Corp

ТЕРМИНОЛОГИЯ

*1 Эффект Киркендала

Был открыт в 1947 году в результате экспериментальных исследований эффекта диффузии.

При наличии контакта двух металлов с последующей взаимной диффузией из-за различия в коэффициентах диффузии, и, следовательно, в скоростях диффузии, наблюдается образование пустот. ■