

Паяные соединения поверхностного монтажа

Сергей Алексеев (Санкт-Петербург)

В статье рассмотрена модель для оценки усталостной долговечности паяных соединений поверхностного монтажа, которую возможно применять как на стадии проектирования приборов РЭА, так и в процессе производства и эксплуатации.

Известно, что сборку и монтаж высококачественных электронных модулей для отрасли приборостроения с повышенной надёжностью и повторяемостью образцов продукции может обеспечить только автоматизированная технология поверхностного монтажа (АТПМ). Отличительной особенностью АТПМ является снижение влияния человеческого фактора. Но нельзя забывать, что надёжность (усталостная долговечность) паяных соединений (ПС) поверхностного монтажа в приборостроении закладывается на стадии проектирования (выбор материалов, ЭКБ, значение их коэффициента термического расширения (КТР) и так далее), а также обеспечивается технологией изготовления [1–5]. Методы обеспечения высокого уровня надёжности РЭА на этапах производства и эксплуатации общеизвестны и заключаются в строжайшем соблюдении требуемой технологии изготовления, проведении технологических прогонов и тренировок комплектующих изделий, наличии отлаженного системного контроля и мониторинга работоспособности состояния системы. В то же время зачастую без должного внимания остаётся обеспечение высокого уровня надёжности на этапе разработки радиоэлектронной аппаратуры [6–8].

В процессе разработки изделия необходимо спрогнозировать его работоспособность на заданный срок с известным уровнем отказов. Это возможно сделать либо проведя ускоренные испытания на старение, эквивалентные заданному сроку эксплуатации, либо проведя математическое моделирование с учётом указанных параметров. Проведение ускоренных испытаний на старение выполняют для проверки работоспособности блока в целом, при заданном сроке эксплуатации. Однако после

подобных испытаний использовать по назначению изделие уже не может [3, 9]. Для реального производства проводить испытания на старение, имитирующие срок службы всех изделий, невозможно. Требуется математическая модель, которая, учитывая основные влияющие факторы формирования паяного соединения, позволит дать оценку надёжности такого соединения.

Надёжностное проектирование паяных соединений для использования в жёстких условиях эксплуатации

За рубежом надёжностное проектирование занимает особое место, а проблемами надёжности занимаются такие организации, как «Центр перспективного проектирования жизненного цикла изделий при Мэрилендском университете США» (The Center for Advanced Life Cycle Engineering – CALCE), Sandia National Laboratories, CirVibe Inc., DfR Solutions, Electronics Packaging Solutions International Inc. и другие. Каждая из этих компаний занимается расчётом надёжности паяных соединений в изделиях заказчиков, в том числе и для жёстких условий эксплуатации. В России надёжностное проектирование пока не получило широкого применения среди разработчиков РЭА для использования в жёстких условиях эксплуатации. В первую очередь это связано с отсутствием актуальной нормативно-технической документации (НТД) по прогнозированию и оценке усталостной долговечности паяных соединений поверхностного монтажа. В настоящее время оценить надёжность паяного соединения и электронного модуля с помощью расчётов можно только по справочнику «Надёжность электрора-

диоизделий» [8]. Однако по справочнику при расчёте паяного соединения учитывается только пайка электрорадиоизделий (ЭРИ) волной, ручная пайка ЭРИ с накруткой и без неё, а значительной базовой интенсивности отказов для паяных соединений поверхностного монтажа нет. Поэтому актуальной проблемой в настоящее время является прогнозирование работоспособности РЭА на заданный срок на этапе проектирования, в том числе это относится и к паяным соединениям поверхностного монтажа. Решением указанной проблемы является проведение ускоренных испытаний на старение, эквивалентные заданному сроку эксплуатации, либо проведение математического моделирования с учётом указанных параметров.

В работе [5] впервые обосновано и показано применение математической модели на основе χ^2 – распределения для прогнозирования показателей надёжности паяных соединений поверхностного монтажа. Необходимо отметить, что для реализации такого подхода необходимо одновременное проведение испытаний, а это увеличивает затраты на временные и производственные ресурсы. Модель Энгельмайера-Уайльда для прогнозирования усталостной долговечности паяных соединений поверхностного монтажа не имеет этих недостатков. Данная модель учитывает достаточно большой ряд характеристик, описывающих большинство критических факторов, сильно влияющих на формирование паяных соединений, в том числе с учётом физического механизма формирования отказа [3–5] и позволяет на этапе проектирования выявить наиболее уязвимые паяные соединения без проведения дополнительных испытаний на старение.

Факторами, которые необходимо учитывать при проектировании изделий, в том числе для жёстких условий эксплуатации, являются геометрические размеры паяного соединения или его эффективная площадь, размеры компонента, материал основания печатной платы (ПП), финишное покрытие ПП, материал компонента,

финишное покрытие выводов компонента, тип и температура плавления припоя, средняя температура паяного соединения, термопрофиль оплавления.

Порядок расчёта величин усталостной долговечности паяных соединений представлен на примере исходных данных для космической аппаратуры с учётом диапазона рабочих температур в пределах +10...+70°C и 16 циклами в сутки (длительность одного цикла составляет 90 минут).

Прогнозирование величин усталостной долговечности паяных соединений начинается с расчёта значения показателя усталостной пластичности c , который приведён в работах [3–5, 9] и зависит от температуры и времени, компенсирует неполную релаксацию напряжений и вычисляется по формуле:

$$c = c_0 + c_1 T - c_2 \ln\left(1 + \frac{t_0}{t_1}\right), \quad (1)$$

где T – средняя циклическая температура паяного соединения в градусах Цельсия, t – полупериод временно́го цикла в минутах. Остальные параметры приведены в таблице 1.

Следующим шагом необходимо рассчитать циклические усталостные повреждения (ΔD) в поверхностно монтируемых жёстких безвыводных паяных соединениях, в которых напряжения в припое превышают предел его текучести, по формуле [5]:

$$\Delta D_{\text{безвыв.}} = \frac{F L_D \Delta \alpha \Delta T_c}{h}, \quad (2)$$

где F – 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, а также различия в расширениях материалов на границе раздела и другие – имеет значение от 0,7 до 1,2 (для безвыводных паяных соединений). Необходимо отметить, что компоненты с шариковыми или столбиковыми выводами считаются безвыводными паяными соединениями вследствие отсутствия гибких выводов; L_D – максимальное расстояние между паяными соединениями в компоненте, измеряемое от центра компонента (нейтральной точки) до края вывода, мм; $\Delta \alpha$ (ΔKTR) – абсолютная разли-

ца в коэффициентах теплового расширения компонента (α_c) и платы ($\alpha_{\text{пп}}$), 1/°C; ΔT_c – эквивалентный циклический диапазон температуры, учитывающий эффекты рассеяния мощности в компоненте и внешние изменения температуры, °C (в нашем случае она составляет 100°C); h – высота паяного соединения, мм.

Результаты расчётов циклических усталостных повреждений (L_D) для безвыводных паяных соединений представлены в таблице 2.

Значение циклического повреждения выводного соединения ($\Delta D_{\text{вывод.}}$) определяется соотношением [5]:

$$\Delta D_{\text{безвыв.}} = \frac{F K_D (L_D \Delta \alpha \Delta T_c)^2}{M A h}, \quad (3)$$

где K_D – «диагональная» изгибная жёсткость свободного (неприпаянного) вывода компонента (варьируется от 9 до 90 Н/мм); A – эффективная площадь паяного соединения, мм²; M – коэффициент масштабирования,

$M = 919$ кПа. Параметры $\Delta \alpha$, F , ΔT_c , h , L_D описаны в уравнении (2).

Результаты расчётов циклических усталостных повреждений (ΔD) для выводных паяных соединений представлены в таблице 3.

Указанные параметры определяют собой физические причины отказа и задают тем самым среднюю наработку на отказ. Видно, что с целью повышения надёжности (долговечности) ПС в процессе проектирования высоконадёжных электронных модулей (ЭМ) на печатных платах, собираемых по технологии поверхностного монтажа, необходимо осуществить оптимальный выбор конструктивных параметров проектируемого ЭМ, обеспечивающих минимизацию уровня напряжения и, соответственно, величин пластической деформации, возникающих в припое ПС в процессе температурного расширения и взаимодействия компонента и подложки, на которую он припаян.

Таблица 1. Параметры модели усталости паяных соединений

Припой	Параметры модели			
	C_0	$C_1, (^\circ\text{C})^{-1}$	C_2	$t_0, \text{мин}$
SnPb	0,442	6×10^{-4}	$1,74 \times 10^{-2}$	360

Таблица 2. Исходные данные и результаты расчётов циклических усталостных повреждений для безвыводных паяных соединений поверхностного монтажа

Компоненты	LGBA1225T1,27	LGBA144	SR0402	SR0603	SR1206	QFN16
Параметры						
F	1	1	0,7	0,7	0,7	1
$h, \text{мм}$	0,60	0,45	0,075	0,075	0,075	0,075
$L_D, \text{мм}$	30,47	9,19	0,55	0,85	1,65	2,12
$\alpha_c, 1/^\circ\text{C}$	0,000016	0,000014	0,000008	0,000008	0,00001	0,000014
$\alpha_{\text{пп}}, 1/^\circ\text{C}$	0,000018	0,000018	0,000018	0,000018	0,000018	0,000018
$\Delta \alpha, 1/^\circ\text{C}$	0,000002	0,000004	0,00001	0,00001	0,000008	0,000004
$\Delta T_c, ^\circ\text{C}$	100	100	100	100	100	100
$\Delta D_{\text{безвывод.}}$	0,01016	0,00817	0,00513	0,00793	0,01232	0,01131

Таблица 3. Исходные данные и результаты расчётов циклических усталостных повреждений для выводных паяных соединений

Компоненты	LQFP48	SSOP28	TSSOP64
Параметры			
F	1	1	1
$K_D, \text{Н/мм}$	9	9	9
$A, \text{мм}^2$	0,132	0,225	0,132
$h, \text{мм}$	0,075	0,075	0,075
$L_D, \text{мм}$	6	6	10
$\alpha_c, 1/^\circ\text{C}$	0,000014	0,0000145	0,000014
$\alpha_{\text{пп}}, 1/^\circ\text{C}$	0,000018	0,000018	0,000018
$\Delta \alpha, 1/^\circ\text{C}$	0,000004	0,0000035	0,000004
$\Delta T_c, ^\circ\text{C}$	100	100	100
$\Delta D_{\text{вывод.}}$	0,0043624	0,003343	0,008903

Для прогнозирования количества циклов $N_{0,5}$, при наработке на отказ половины паяных соединений поверхностного монтажа каждого типа, имеем [3–5, 9]:

$$N_{0,5} = \frac{1}{2} \left(\frac{2\varepsilon}{\Delta D} \right)^{c-1},$$

где $\varepsilon = 0,325$ – коэффициент усталостного повреждения, c – степенной показатель усталостной пластичности, вычисляемый по формуле (1), ΔD – циклическое повреждение для каждого компонента.

Результаты прогнозирования количества циклов $N_{0,5}$ представлены в таблице 4.

Рассчитаем минимальное количество циклов N_1 до первого отказа при допустимой максимальной вероятности отказа $\gamma = 0,1$ по формуле [10]:

$$N_1(\gamma) = N_{0,5} \left[\frac{\ln(1-\gamma)}{\ln(0,5)} \right]^{\beta-1},$$

где β – параметр формы Вейбулла (при прогнозировании безвыводных компонентов $\beta = 4$, выводных – $\beta = 2$).

Результаты прогнозирования минимального количества циклов без отказов при максимальной вероятности отказа приведены в таблице 4.

Из таблицы 4 видно, что в первую очередь в процессе испытаний откажут паяные соединения поверхностного монтажа следующих компонентов: SR1206, QFN16 и LPGA1225.

По результатам прогнозирования минимального количества циклов до первого отказа, в первую очередь откажут паяные соединения следующих компонентов поверхностного монтажа: SR1206, QFN16, LPGA1225 и TSSOP64.

Перечень компонентов сохранился за исключением добавления компонента TSSOP64, что связано с геометрическими размерами корпуса (L_p), а также с применением в расчётах приближенно-ориентировочных значений КТР и параметра K_D . Для более точного прогноза необходимо определять реальные значения КТР каждого компонента и ПП, а также методом конечного моделирования определять пара-

метр K_D для каждого выводного компонента.

Такая разница в значениях объясняется влиянием локальной системы компонент–припой–ПП, связанной с разницей коэффициентов термических расширений (КТР). Поэтому при проектировании электронных модулей необходимо в первую очередь учитывать выбор компонентов по конструктивному признаку с учётом физико-химических параметров (КТР, размер, гибкость выводов и т. д.) для снижения влияния системы компонент–припой–ПП с учётом дальнейшего режима хранения или эксплуатации данного модуля.

Таким образом, прогнозирование усталостной долговечности паяных соединений поверхностного монтажа на основе модели Энгельмайера-Уайльда с использованием распределения Вейбулла позволяет математически оценить вклад каждого компонента в надёжность электронного модуля, в том числе ещё на этапе проектирования, и выявить те компоненты, которые её снижают.

Необходимо отметить, что основным методом, который позволяет установить реальный уровень надёжности приборов РЭА, является одновременный анализ испытаний и теоретических данных расчёта усталостной долговечности паяных соединений поверхностного монтажа.

Важно также понимать, что потенциальная надёжность паяных соединений и электронного модуля в целом закладывается в процессе проектирования, а реализуется в процессе производства после отработки и полной оптимизации параметров технологии сборки и монтажа, в том числе дозированного нанесения припойной пасты и температурно-временных режимов пайки.

В заключение можно рекомендовать применять надёжностное проектирование на основе модели Энгельмайера-Уайльда всем предприятиям-разработчикам РЭА для жёстких условий эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Н.Н., Ивин В.Д., Алексеев С.А. Исследование надёжности бессвинцовых и ком-

бинированных паяных соединений в условиях жёстких воздействующих факторов. Часть 1. Цели, объекты, программа и методика сравнительных ускоренных испытаний. Анализ результатов испытаний. Вопросы радиоэлектроники. 2009. Сер. ОТ. Вып. 4. С. 85–102.

2. Иванов Н.Н., Ивин В.Д., Алексеев С.А. Исследование надёжности бессвинцовых и комбинированных паяных соединений в условиях жёстких воздействующих факторов. Часть 2. Анализ результатов испытаний, оценка надёжности ПС по результатам сравнительных испытаний. Выводы и рекомендации. Вопросы радиоэлектроники. 2009. Сер. ОТ. Вып. 4. С. 103–114.

3. IPC-SM-785 USA. Руководство по ускоренным испытаниям на надёжность паяных соединений поверхностного монтажа.

4. Engelmaier W. Wear-Out System Reliability with Multiple Components and Load Levels. Global SMT & Packaging. 2008. July. Vol. 8. №7. Pp. 30–39.

5. IPC-D-279. Руководство по проектированию надёжных модулей на печатных платах, собираемых по технологии поверхностного монтажа.

6. Шавловский И.В., Иванов Н.Н., Ивин В.Д., Алексеев С.А. Оценка показателей надёжности паяных соединений при поверхностном монтаже. Сборник научных трудов аспирантов, соискателей и студентов магистерской подготовки ОАО «Авангард». 2011. Выпуск 3. ОАО «Авангард». СПб. С. 242–249.

7. 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». 2010. Выпуск 2. ОАО «Авангард». СПб. Аграф+. С. 32–46.

8. Надёжность электрорадиоизделий. РД В 319.01.20-98. Надёжность ЭРИ ИП. Справочники, разработанные 22 ЦНИИИ МО при участии РНИИ «Электронстандарт» и АО «Стандартэлектро». Версия АСРН 2006.

9. IPC-9701A USA. Методы испытаний для определения характеристик паяных соединений и требования к проведению испытаний.

10. Иванов Н.Н., Ивин В.Д., Алексеев С.А., Фёдоров С.С. Применение электрорадиоизделий иностранного производства в бессвинцовом исполнении в космической аппаратуре. Сборник научных трудов аспирантов, соискателей и студентов магистерской подготовки ОАО «Авангард». 2012. Выпуск 4. ОАО «Авангард». СПб. С. 68–77.

Таблица 4. Результаты расчётов количеств циклов $N_{0,5}$ и N_1

Компоненты	LPGA1225	LPGA144	SR0402	SR0603	SR1206	QFN16	LOFP48	SSOP28	TSSOP64
$N_{0,5}$	7289	12041	35161	12889	4672	5686	51166	94523	9880
N_1	1420	2347	6853	2512	911	1108	9973	18424	1926



Новости мира News of the World Новости мира

Электронные компоненты Merrimac Industries и Signal Technology в программе поставок ПРОЧИП

Подразделение ПРОЧИП сообщает о начале официального сотрудничества с направлением Microwave Solutions компании Crane Aerospace & Electronics. Теперь заказчикам доступны электронные компо-

ненты торговых марок Merrimac Industries и Signal Technology.

В программу поставки входят радиационно-стойкие СВЧ-компоненты класса Space, ориентированные на применения в аппаратуре космического назначения, а также в проектах с повышенными требованиями к надёжности компонентной базы:

- СВЧ-клапаны и циркуляторы;

- смесители;
- делители мощности;
- модуляторы и демодуляторы;
- направленные ответвители;
- СВЧ-переключатели;
- другие СВЧ-компоненты.

Технические характеристики наиболее востребованных в России компонентов Crane Microwave Solutions приведены в таблице.

Делители мощности						
Заказной номер	Диапазон частот, МГц	Развязка между выходами, дБ, не менее	Вносимые потери, дБ, не более	Фазовый разбаланс	Разбаланс сигналов в выходных плечах, дБ	Исполнение
PDG-02B-50 SQ	1-100	30	0,7	2	0,15	SMD
PDG-02B-255 SQ	10-500	25	0,7	3	0,2	SMD
PDG-02B-500 SQ	20-1000	18	1,0	3	0,3	SMD
PDG-02B-1005 SQ	100-200	15	1,8	5	0,5	SMD
PDF-2A-50 SQ	1-100	30	0,7	2	0,15	Flatpack
PDF-2A-250 SQ	10-500	25	0,7	2	0,2	Flatpack
PDF-2A-1000 SQ	100-2000	15	1,8	5	0,5	Flatpack
PDF-4E-1300 SQ	100-2000	20	2,5	5	0,5	Flatpack
PDF-4E-250 SQ	10-500	25	1,2	3	0,2	Flatpack
Смесители						
Заказной номер	Диапазон частот, МГц	Вносимые потери, дБ	Развязка L-R, дБ, не менее	Развязка L-I, дБ, не менее	IP3, дБм, не менее	Исполнение
DMF-2A-250 SQ	0,5-500	8	35	25	+10	Flatpack
DMF-2A-1700 SQ	500-2500	9	30	20	+10	Flatpack
Направленные ответвители						
Заказной номер	Диапазон частот, МГц	Переходное ослабление, дБ	Неравномерность переходного ослабления, ± дБ	Направленность, дБ	Вносимые потери, дБ	КСВН
CBG-10B-375 SQ	5-750	10±1	0,5	20	1,3	1,5:1
CBG-20B-375 SQ	5-750	20±1	0,75	18	1,0	1,5:1
CBG-11B-1250	100-2000	11±1	0,5	15	1,5	1,7:1
CBG-20B-1250	100-2000	20±1	0,5	15	1,5	1,7:1

www.prochip.ru

CREE приобретает компанию APEI

Компания CREE приобрела компанию APEI, производителя силовых модулей и решений в области силовой электроники. Комбинация двух инноваторов высоко класса позволит компании Cree упрочить своё лидерство в области силовой электроники и ВЧ-продуктов, а также расширить позиции высокопроизводительных, лучших в своём классе SiC силовых модулей.

Это приобретение укрепляет лидирующие позиции CREE путём добавления интеллектуальной собственности и экспертных приложений на системном уровне от APEI. Миссия компании – доставка инновационных решений на базе карбида кремния в области силовой электроники уже позволила CREE



работать над множественными правительственными контрактами. В 2014 году компания CREE работала над разработкой высокопроизводительного зарядного устройства для гибридных электрических транспортных средств по программе ARPA-E, что принесло компании премию R&D 100 и включение её работы в список 100 наиболее инновационных технологий года.

«Добавление в наш портфель команды экспертов и пакета патентов APEI позволит расширить наше присутствие на рынке, – сказал исполнительный вице-президент силового и РЧ-департамента CREE Фрэнк

Пластина. – Расширение наших возможностей разработки благодаря APEI, лидера в области R&D силовой электроники, позволит ускорить разработку и производство полного спектра силовых модулей SiC для удовлетворения потребностей наших заказчиков, как в плане производительности, так и по цене».

«Объединение усилий лидеров рынка SiC даёт нам возможность быстрее выводить наши продукты на рынок, – сказал президент и главный исполнительный директор APEI Алекс Лостеттер. – Это идеальное сочетание технологии производства чипа и корпусирования даст нам преимущество первопроходца в установке отраслевого стандарта для силовых модулей».

www.macrogroupp.com