

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ

© 2016 А.В. Иванов, М.Н. Пиганов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 08.11.2016

Описаны отказы паяных соединений поверхностного монтажа на многослойных печатных платах. Рассмотрены вопросы усталостной прочности паяных соединений электронных узлов. Проведён анализ моделей качества и надёжности Энгельмайера и математических выражений Уайльда, описывающих усталостные деформации в припоях. Предположена и решена тестовая задача для оценки адекватности моделей надёжности. Получены сравнительные данные результатов расчёта надёжности по программе «Solder-1» с параметрами тестовой задачи.

Ключевые слова: электронный узел, паяное соединение, припой, качество, надёжность, усталостная прочность, модели надёжности, программа расчета, сравнительная оценка.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы увеличилось число аварий из-за отказов бортовых радиотехнических и электронных устройств. Отказы изделий космической промышленности приводят к большим финансовым потерям ввиду невозможности или дороговизны выявления и ремонта отказа, произошедшего на объекте, находящемся в космосе, и даже к смертельным исходам [1]. Одной из причин этого является слабая изученность вопросов надёжности импортной элементной базы, паяных соединений в условиях комбинированной и смешанной пайки, низкая информативность испытаний, отсутствие необходимого опыта проектирования и производства изделий с такими конструктивно-технологическими вариантами [2].

В современных конструкциях радиотехнических устройств монтаж компонентов производится на многослойные печатные платы с высокой плотностью межсоединений. Технология межсоединений меняется быстрыми темпами. Используются компоненты с разным составом покрытий. Монтаж производится как свинцово-содержащими так и бессвинцовыми припоями.

Пайка представляет собой соединение монтажного проводника или вывода электро-радиоизделия (ЭРИ) с контактным элементом (контактной площадкой) расплавленным сплавом (припоем), который, затвердевая, образует паяное соединение. В процессе пайки происходят взаимное растворение и диффузия основного металла и припоя. Структура паяного соединения включает следующие основные элементы: зону

сплавления, диффузионные зоны, прикристаллизованные слои и основной металл [3].

В настоящее время надёжность паяного соединения представляет особую актуальность. Установлено, что надёжность паяных соединений поверхностного монтажа определяется областью отказов типа «износ» [4]. Надёжность паяного соединения – это способность функционировать в заданных условиях в течение определенного периода времени без превышения заданного уровня интенсивности отказов. Она определяется в первую очередь прочностью паяного соединения.

При механических нагружениях паяное соединение испытывает два вида напряжений: нормальное и касательное. Соответственно существуют два типа разрушения: путем отрыва от действия максимальных нормальных напряжений и путем среза от максимальных касательных напряжений. Различают и две характеристики прочности: сопротивление отрыву и сопротивление срезу. Установлено, что для припоя сопротивление отрыву выше его сопротивления срезу, а сопротивление срезу ниже предела текучести [5]. Прочность паяного соединения зависит от дефектов в его структуре: «холодная пайка»; отсутствие смачивания; эрозия основного металла; газовые и усадочные поры; флюсовые, шлаковые и интерметаллические включения; кристаллизационные, релаксационные и термические трещины; и др. [6].

В связи с этим возникает задача изучения усталостной прочности и оценки надёжности паяных соединений на основе различных припоев.

**АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ
УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ**

Усталость припоя – изменение состояния припоя в результате многократного (циклического) деформирования, приводящее его к прогрессирующему разрушению. Если проанализи-

*Иванов Андрей Васильевич, аспирант кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств.
E-mail: kipres@ssau.ru*

*Пиганов Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств.
E-mail: piganov@ssau.ru*

ровать процесс разрушения пайки от действия переменных напряжений, то можно выделить две его фазы: образование микротрещины, а затем ее дальнейшее развитие до полного разрушения пайки. Протекание первой фазы связано со структурными особенностями материала, состоянием поверхности и амплитудой цикла. Во второй фазе сохраняют влияние структурные особенности и амплитуда цикла, но вступают в силу новые факторы, такие как размеры и форма пайки и законы распределения напряжений по ее объему.

Первые модели усталостной прочности паяных соединений на основе эвтектических оловянносвинцовых припоев были разработаны Вернером Энгельмайером [7]. Общую модель можно представить следующим образом:

$$N_f(50\%) = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{2\varepsilon'_f}{\Delta D} \right]^m, \quad (1)$$

где m – усталостный коэффициент;

ε'_f – коэффициент пластического усталостного разрушения, равен 0,325 для почти эвтектических оловянных припоев;

ΔD – размах циклической нагрузки;

$N_f(50\%)$ – среднее значение циклов работы до отказа.

Показатель m определяется из выражения:

$$\frac{1}{m} = 0,042 + 6 \cdot 10^{-4} \cdot \overline{T_{SJ}} - 1,74 \cdot 10^{-2} \cdot \ln \left(1 + \frac{360}{t_D} \right), \quad (2)$$

где $\overline{T_{SJ}}$ – средний температурный размах термоциклов;

t_D – время полуцикла в минутах.

Выражения 1 и 2 основаны на классических результатах исследований Роджера Уайльда (IBM) [8], который использовал изотермические циклы при разных температурах и видах циклов для определения температурной и временной зависимости усталостных деформаций.

Размах циклической нагрузки припоя для безвыводных компонентов Энгельмайер предложил определять по формуле:

$$\Delta D = \left[\frac{F \cdot DNP \cdot \Delta CTE \cdot \Delta T}{h} \right],$$

где F – технический параметр, для компонентов с галтелью ~1,2 ... 0,7, для компонентов без галтели ~1,5 ... 1,0;

DNP – расстояние до нейтральной точки/плоскости;

ΔCTE – разность коэффициентов ТКЛР;

ΔT – отклонение температуры в течение цикла;

h – высота паяного соединения,

а для компонентов с выводами по следующей формуле:

$$\Delta D = \left[\frac{F \cdot K \cdot (DNP \cdot \Delta CTE \cdot \Delta T)^2}{(133psi) \cdot A \cdot h} \right],$$

где F – технический параметр, ~1,0;

K – диагональная жесткость вывода на изгиб;

A – эффективная площадь паяного соединения;

h – высота паяного соединения, поскольку она может быть разной, принято считать $h=1/2$ толщины трафарета;

133psi – 919 кПа.

В работе [9] была предложена формула для определения среднего температурного размаха термоциклов:

$$\overline{T_{SJ}} = \frac{1}{4} \cdot (T_C + T_{C,0} + T_S + T_{S,0}),$$

где T_C, T_S – максимальные за цикл температуры компонента и подложки соответственно;

$T_{C,0}, T_{S,0}$ – минимальные за цикл температуры компонента и подложки соответственно.

А величину ΔT_e предложено определять следующим образом:

$$\Delta T_e = \left[\frac{CTE_C \cdot (T_C - T_{C,0}) - CTE_S \cdot (T_S - T_{S,0})}{CTE_C - CTE_S} \right].$$

Она заменяет ΔT для активных компонентов, которые рассеивают мощность из-за разности температур нагретых компонентов и подложки.

В 2008 году впервые была опубликована модель усталостной надёжности для бессвинцовых припоев SAC 405/305 [10]. Затем она была уточнена в [11]. Усталостный показатель текучести было предложено определять по формуле:

$$\frac{1}{m} = C_0 + C_1 \cdot \overline{T_{SJ}} + C_2 \cdot \ln \left(1 + \frac{t_D}{t_0} \right),$$

где C_0 – характеризует связь между усталостным процессом и количеством циклов до отказа;

C_1 – поправочный коэффициент, отражающий зависимость температуры от текучести;

C_2 – поправочный коэффициент, отражающий зависимость времени от процесса растекания припоя;

t_0 – время завершения процесса растекания при температуре около 50 °С; чем короче время t_0 , тем более незавершенным считается процесс растекания.

Автором [12] эти модели модернизированы. Им скорректированы весовые коэффициенты температуры и времени пайки, вида припоя и оценки циклического повреждения, позволяющие рассчитывать надёжность смешанных паяных соединений для штыревого и поверхностного вариантов как при ручном, так и автоматизированном монтаже.

Однако проведённые нами исследования показали, что экспериментальные результаты оценки надёжности паяных соединений во многих случаях не совпадают с расчётными показателями, полученными по модернизированной модели. В связи с этим возникла необходимость дополнительной оценки исходных моделей усталостной прочности. Для этого была разрабо-

тана программа расчёта усталостной прочности «Solder- 1». Для оценки качества программы была решена тестовая задача.

Исходные данные были взяты из [7].

ОПИСАНИЕ ТЕСТОВОЙ ЗАДАЧИ

Целью данной задачи является расчет усталостной надежности пайки для электронной системы с проектным сроком службы 10 лет с одним циклом включения/выключения в день, работающей в условиях, при которых кондиционирование воздуха может не функционировать два раза в год из-за поломок или текущего ремонта. Таким образом, мы получим 3 630 циклов нормальной работы и 20 циклов работы без кондиционирования воздуха. Допустимая вероятность отказа в конце 10-ти летнего срока составляет 0,5 %. Система состоит из пяти 68 выводных микросхем в корпусах PLCC (68 I/O PLLC), четырех 596 выводных микросхем в пластиковых корпусах BGA (596 I/O BGA), тридцати бескорпусных резисторов 1206 (1206 RC), трех бескорпусных конденсаторов 1825 (1825 CC), одного радиочастотного усилителя мощности (RF усилитель) на 10 Вт и одного

144-выводного монтируемого на поверхность разъёма (Разъем). Все элементы смонтированы на поверхности печатной платы FR-4 (ПП).

Эта система иллюстрирует разнообразие (используемых на практике) компонентов. В табл. 1 представлены физические параметры компонентов системы. Необходимо помнить, что для некоторых компонентов получить эти параметры весьма непросто. Технические данные не всегда предоставляют полную информацию, или могут содержать ошибки, а коэффициент теплового расширения (СТЕ) часто необходимо измерять.

В табл. 2 представлены температурные параметры компонентов системы. Для получения этих параметров с требуемой точностью необходимо провести температурный анализ системы.

В данной задаче используется оловянно-свинцовый припой, параметры модели которого представлены в табл. 3. Параметры режимов испытания приведены в табл. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ТЕСТОВОЙ ЗАДАЧИ

Результаты решения тестовой задачи приведены в табл. 5-10. В них приведены эталонные

Таблица 1. Физические параметры компонентов системы

i	Компонент	n	DNP (мм)	h (мм)	L (мм)	K (Н/мм)	A (мм ²)	СТЕ (ppm/°C)
1	68 I/O PLLC	5	17,1	0,076	1,52	11,7	0,39	17
2	596 I/O BGA	4	15,9	0,572	0,001	-	-	11,4
3	1206 RC	30	1,3	0,076	0,002	-	-	9,5
4	1825 CC	3	1,78	0,076	0,635	-	-	11,5
5	RF усилитель	1	18,0	0,076	7,81	36	30	7,8
6	Разъем	1	30,3	0,127	0,762	16,3	0,116	12,9
	ПП	-	-	-	-	-	-	16

Таблица 2. Температурные параметры компонентов системы

j	i	Компонент	T _{so} (°C)	T _s (°C)	T _{co} (°C)	T _c (°C)
1	1	68 I/O PLLC	21	58	21	64
	2	596 I/O BGA	21	58	21	64
	3	1206 RC	21	55	21	55
	4	1825 CC	21	55	21	55
	5	RF усилитель	21	63	21	75
	6	Разъем	21	55	21	55
2	1	68 I/O PLLC	21	73	21	79
	2	596 I/O BGA	21	73	21	79
	3	1206 RC	21	70	21	70
	4	1825 CC	21	70	21	70
	5	RF усилитель	21	78	21	90
	6	Разъем	21	70	21	70

Таблица 3. Параметры модели оловянно-свинцового припоя

Припой	ε'_f	c_0	c_1	c_2	t_0	СТЕ (ppm/°C)
SnPb	0,325	0,442	6,00e-04	-1,74e-02	360	25.5

Таблица 4. Параметры режимов

j	Количество циклов	Длительность цикла (мин.)	Описание
1	3 630	480	Штатный режим
2	20	480	Аварийный режим

Таблица 5. Эталонные значения параметров общего рассогласования

j	i	Компонент	dD	N(50%)	N(0,5%)	N/N(x%)
1	1	68 I/O PLLC	0,0024	114000	22100	0,1647
	2	596 I/O BGA	0,0059	15300	2960	1,2264
	3	1206 RC	0	1,00E+11	2,00E+10	0
	4	1825 CC	0,0025	108000	20900	0,1738
	5	RF усилитель	0,0003	7,00E+06	1,00E+06	0,0027
	6	Разъем	0,0118	3490	675	5,3786
2	1	68 I/O PLLC	0,0029	6,48E+04	1,25E+04	0,0815
	2	596 I/O BGA	0,0093	5230	1010	0,012
	3	1206 RC	0	5,00E+10	1,00E+10	0
	4	1825 CC	0,0036	43000	8320	0,0024
	5	RF усилитель	0	1,00E+06	1,93E+05	0,0001
	6	Разъем	0,0246	646	125	0,1601

Таблица 6. Расчетные значения параметров общего рассогласования

j	i	Компонент	dD	N(50%)	N(0,5%)	N/N(x%)
1	1	68 I/O PLLC	0,0024	114364	22045	0,164198
	2	596 I/O BGA	0,005897	15251	2963	1,22732
	3	1206 RC	0	1,00E+11	2,00E+10	0
	4	1825 CC	0,0025	108432	20838	0,174391
	5	RF усилитель	0,000299	7028700	1004650	0,002691
	6	Разъем	0,011798	3481	677	5,392047
2	1	68 I/O PLLC	0,002893	64994	12463	0,081855
	2	596 I/O BGA	0,009277	5243	1006	0,012031
	3	1206 RC	0	5E+10	1,00E+10	0
	4	1825 CC	0,00359	43212	8324	0,002407
	5	RF усилитель	0	1001050	193916	0,000996
	6	Разъем	0,024526	647	125	0,159852

и расчетные значения, параметров общего рассогласования, а также значения вероятности отказа системы. Различие результатов вычисления программы и решения составили не более 1%. Следовательно данная программа может быть рекомендована для практических целей.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ моделей качества и усталостной надежности паяных соединений показал целесообразность их использования для широкой номенклатуры припоев. Решение

Таблица 7. Эталонные значения параметров местного рассогласования

j	i	Компонент	dD	N(50%)	N(0,5%)	N/N(x%)
1	1	68 I/O PLLC	0,0032	58700	11400	0,3198
	2	596 I/O BGA	0	2,00E+11	4,00E+10	0
	3	1206 RC	0	4,00E+10	8,00E+09	0,00E+00
	4	1825 CC	0,0266	584	113	32,1427
	5	RF усилитель	0,0809	48	9	391,07
	6	Разъем	0,0015	319000	61700	0,0588
2	1	68 I/O PLLC	0,0044	27300	5280	0,0038
	2	596 I/O BGA	0	8,00E+10	2,00E+10	0
	3	1206 RC	0	1,00E+10	2,00E+09	0,00E+00
	4	1825 CC	0,0383	245	47	0,4221
	5	RF усилитель	0,1034	27	5	3,8305
	6	Разъем	0,0022	126000	24400	0,0008

Таблица 8. Расчетные значения параметров местного рассогласования

j	i	Компонент	dD	N(50%)	N(0,5%)	N/N(x%)
1	1	68 I/O PLLC	0,003195	58468	11451	0,318697
	2	596 I/O BGA	0	1,99E+11	4,02E+10	0
	3	1206 RC	0	4,00E+10	8,03E+9	0
	4	1825 CC	0,026616	585	113	32,11056
	5	RF усилитель	0,080641	48	8	389,9163
	6	Разъем	0,001496	320499	61703	0,058947
2	1	68 I/O PLLC	0,004412	27311	5259	0,003807
	2	596 I/O BGA	0	7,98E+10	2,01E+10	0
	3	1206 RC	0	9,98E+9	1,99E+9	0
	4	1825 CC	0,038363	245	47	0,42286
	5	RF усилитель	0,103162	27	5	3,846588
	6	Разъем	0,0022	125760	24436	0,000801

Таблица 9. Вероятность отказа системы (эталонные значения)

i	Компонент	P _{отк общ} (%)	P _{отк мест} (%)	P _{отк сумм} (%)
1	68 I/O PLLC	0,36	1,35	1,71
2	596 I/O BGA	0,93	0	0,93
3	1206 RC	0	0	0
4	1825 CC	0	100	100
5	RF усилитель	0	100	100
6	Разъем	55	0,01	55,01
Система		56,29	100	100

тестовой задачи подтвердило эффективность программы расчета показателей надежности системы компонент-припой-печатная плата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наседкин А.В., Тюлевин С.В., Пиганов М.Н. Методика производственных испытаний электронных узлов // Вестник Самарского государственного
2. Наседкин А.В. Методика и средства испытаний паяных соединений поверхностно-монтируемых радиоэлектронных средств космических аппаратов в условиях комбинированной пайки. Дис. ... канд. техн. наук. Самара: СГАУ. 2015. 178 с.
3. Юрков Н.К. Технология радиоэлектронных средств. Пенза: Изд-во ПГУ. 2012. 640 с.

аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 7. С.76-84.

Таблица 10. Вероятность отказа системы (расчетные значения)

i	Компонент	P_{отк общ} (%)	P_{отк мест} (%)	P_{отк сумм} (%)
1	68 I/O PLLC	0,361584	1,354455	1,716039
2	596 I/O BGA	0,932	0	0,932
3	1206 RC	0	0	0
4	1825 CC	0	100	100
5	RF усилитель	0	100	100
6	Разъем	55,2585	0,01	55,2685
Система		56,55208	100	100

4. Руководящие указания по ускоренным методам испытаний на надёжность паяных соединений технологии поверхностного монтажа: IPC-SM-785, - Association Connecting Electronics Industries. 1992. 44 с.
5. Парфенов А.Н. Введение в теорию прочности паяных соединений // Технологии в электронной промышленности. 2008. №2. С.46-52.
6. Кузнецов О.А., Погалов А.И. Прочность паяных соединений. М.: Машиностроение, 1987. 112 с.
7. Engelmaier W. How to Estimate Solder Joint Reliability, Part 1 // Global SMT & Packaging. September 2007. Vol. 7. No. 9. pp. 60-64.
8. Wild R.N. Some Fatigue Properties of Solders and Solder Joints // IBM Tech. Rep. 73Z000421. January 1973.
9. Engelmaier W. How to Estimate Solder Joint Reliability, Part 2 // Global SMT & Packaging. October 2007. Vol. 7. No. 10. pp. 64-66.
10. Engelmaier W. Creep-Fatigue Model for SAC 405/305 Solder Joint Reliability Estimation – A Proposal // Global SMT & Packaging. December 2008. Vol. 8. No. 12. pp. 46-48.
11. Engelmaier W. Model for Solder Joint Reliability Estimation – A Proposal // Global SMT & Packaging. September 2009. Vol. 9. No 9.
12. Павлов Н.И. Исследование ресурса прочности паяных соединений электронных модулей, выполненных по совмещённой технологии (оловянно-свинцовой и бессвинцовой). Автореф. дис. ... канд техн. наук. М.: МАИ. 2012. 16 с.

QUALITY CONTROL OF SOLDER CONNECTIONS OF ELECTRONIC ASSEMBLIES

© 2016 A.V. Ivanov, M.N. Piganov

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

Failures of solder connections of surface mounting on multilayer printed circuit board were described. The questions of fatigue strength of solder connections were considered. engelmeyer’s models of quality and reliability and wilde’s mathematical models were analyzed. The test task of assessment of the adequacy of reliability model was offered and solved. The comparative data of reliability calculation results on program «Solder-1» with the parameters of the test task was received.

Keywords: electronic assembly, solder connection, solder, quality, reliability, fatigue strength, reliability models, calculation program, comparative evaluation.

Andrey Ivanov, Post-Graduate Student at the Design and Technology of Electronic Systems and Devices Department. E-mail: kipres@ssau.ru

Mikhail Piganov, Doctor of Technical Science, Professor at the Design and Technology of Electronic Systems and Devices Department. E-mail: piganov@ssau.ru