

Моделирование процесса пайки компонентов радиоэлектронных узлов бортовой аппаратуры

С.В. Тюлевин

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34

Рассмотрен технологический маршрут изготовления радиоэлектронных печатных узлов. Установлено, что наиболее критической операцией является пайка оплавлением в парогазовой фазе. Методом экспертных оценок выявлены наиболее существенные факторы данной операции. Для построения математической модели был проведен дробный факторный эксперимент. Получено уравнение регрессии. Проведена проверка данного уравнения на адекватность. Было осуществлено движение по поверхности отклика в направлении градиента линейного приближения до достижения области экстремума. При этом достигнуто увеличение критерия качества.

Ключевые слова: радиоэлектронный печатный узел, бортовая аппаратура, пайка, оплавление, дробный факторный эксперимент, математическая модель, уравнение регрессии, адекватность, коэффициент качества.

Введение

В настоящее время для создания современной радиоэлектронной аппаратуры широко используется технология поверхностного монтажа. Мелкосерийное производство космической аппаратуры предлагает более высокие требования к надежности и ресурсу его работы. Качество и надежность такой аппаратуры во многом зависят от качества межсоединений (паяных соединений), используемых паст, защитных покрытий и других факторов.

Особую остроту вызывает этот вопрос при поверхностном монтаже BGA-компонентов [1; 2]. Для снижения числа производственных и технологических дефектов целесообразно вводить контроль качества монтажа. Однако определяющим фактором высокого качества паяных соединений (ПС) является оптимизация наиболее критических операций технологического процесса.

Целью данной статьи является построение математической модели парофазной пайки BGA-компонентов на основе дробного факторного эксперимента и моделирование этого процесса в условиях реального производства.

1. Анализ технологического процесса

Был исследован технологический маршрут, в состав которого входят следующие операции [3]:

1. 005 Расконсервирование микросхемы BGA.
2. 010 Контроль.
3. 015 Удаление бессвинцового припоя с микросхемы BGA.
4. 020 Лужение контактных площадок микросхемы BGA.
5. 025 Реболлинг.
6. 030 Нанесение паяльной пасты методом трафаретной печати.
7. 035 Установка микросхем на печатной плате (ПП).
8. 040 Пайка оплавлением.
9. 045 Отмывка печатной платы.
10. 050 Визуальный контроль пайки.
11. 055 Рентгеновский контроль пайки микросхем в корпусах BGA.

Рассмотрим наиболее критические операции.

Для пайки были использованы паяльные пасты Sn62Pb36Ag2 с размером частиц от 25 до 45 мкм и содержанием флюса, растворителя активатора и реологических добавок от 8 до 20 %. Исходное значение вязкости составляло 200 ... 700 Па·С. Для обеспечения высокого качества пайки необходимо контролировать вязкость, прочность на сдвиг, гомогенность, время сохранения свойств на трафарете.

Припойную пасту наносили методом трафаретной печати на установке DEK248E. Для этого использовались стальные трафареты толщиной 100...155 мкм с разной формой апертуры. Голов-

ка нанесения пасты была снабжена двумя ракелями и скребком. Давление ракелей регулировалось от 0 до 14,5 кг с шагом 0,5 кг. Рабочий стол регулировался по осям X, Y, θ . Для настройки параметров нанесения пасты использовался шаговый режим. Платы устанавливались на базировочные штыри и фиксировались с помощью вакуумных присосок. Использовались также фиксация платы с помощью краевых зажимов.

Центрирование платы осуществляли с помощью видеосистемы DEKAlign4 и с использованием прозрачного экрана. Управляющий компьютер содержит 35 программ с разными значениями машинных параметров.

Расстояние от верхней плоскости платы до нижней плоскости трафарета изменялось от 0 до 23,5 мм с дискретностью 0,1 мм. Скорость перемещения головки изменялась от 10 до 95 мм/с с дискретностью 1 мм/с. Давление сжатого воздуха на задней панели находилось в пределах 60...70 psi.

Пайка BGA-микросхем проводилась оплавлением в парогазовой фазе на установке VP-6000. Для этого использовалась рабочая жидкость Galden с разной температурой кипения. Для контроля температуры были использованы трех- и восьмиканальный термопрофайлеры, которые помещались в рабочую камеру вместе с тестовым печатным узлом. В ряде случаев использовались вакуумирование. Рентгеновский контроль проводился с помощью системы rsba|analyzer 160T фирмы phoenix|x-ray. Она позволяет осуществлять неразрушающий контроль паяных соединений BGA-микросхем с печатной платой. Такая система обеспечивает большую зону сканирования (18" x 12") снабжена основным (6 дюймов) и дополнительным (9 дюймов) усилителями изображения, двумя рентгеновскими ПЗС-камерами, устройством вращения-наклона с диапазоном углов наклона от 0 до 45°. Кроме того, имеется возможность использовать угол 61°. При этом детектор рентгеновского излучения вращается на 360° вокруг исследуемого паяного соединения. Она имеет специальное программное обеспечение для обработки изображений, измерения изгиба соединительных перемычек, вычисления пустот в шариковых выводах и в зоне их пайки, диаметр шариковых выводов и из форму.

Схема контроля включает в себя следующие операции: визуальный контроль (MANTIS ELITE), контроль вязкости пасты (PM-2A), кон-

троль нанесения пасты (Symbion P36), контроль установки компонентов (Vantage S22), рентгеновский контроль, электрический контроль.

Контроль качества паяных соединений ПС на соответствие требованиям стандартов ОСТ 92-1042 и IPC-7095A проводился после изготовления печатного узла. Допустимое количество пустот в ПС оценивалось по IPC-610D. Качество ПС проверялось по внешним рядам с помощью эрзаскопа. Объем пустот контролировался по всем ПС с помощью рентгеноскопии.

2. Построение математической модели

Важное значение для повышения надежности и экономической эффективности производства электронных средств (ЭС) имеет обеспечение оптимальных режимов технологических операций [4]. Оценка значимости и определение оптимальных параметров отдельных технологических факторов конкретной операции сводятся к построению и последующему анализу ее математической модели (функции отклика) [5]:

$$\eta = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (1)$$

где η – параметр операции, подлежащий оптимизации; x_1, x_2, \dots, x_k – факторы технологической операции.

В большинстве случаев исследование этой зависимости ведется при неполном знании механизма явлений. При этом ограничиваются представлением ее полиномом вида

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (2)$$

где \hat{y} – выборочная оценка для η ; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – выборочные оценки коэффициентов регрессии.

Построение математических моделей операции может производиться с помощью пассивного или активного эксперимента. При пассивном эксперименте стремление вести техпроцесс в рамках технических условий ограничивает варьирование переменных, что приводит к большим ошибкам в определении оценок их влияния на выходные параметры. Активный эксперимент использует искусственные возмущения по управляющим факторам, которые вводятся по заранее спланированной программе. Это облегчает оценку раздельного воздействия любого фактора, либо их взаимного влияния на выходной параметр [6].

Варьирование контролируемых факторов осуществляется на нескольких уровнях k (обычно $k = 2, 3$), а затем реализуются все n возможных

комбинаций уровней. Далее задача сводится к описанию коэффициентов регрессии (2) и является типичной задачей регрессионного анализа при выполнении следующих предпосылок:

- результаты наблюдений $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$ – независимые нормально распределенные величины;
- дисперсии $\sigma^2(\hat{y}_g)$ ($g = 1, 2, n$) равны друг другу;
- независимые переменные x_1, x_2, \dots, x_k измеряются с пренебрежимо малой ошибкой по сравнению с \hat{y} .

Определение оптимального режима технологической операции требует адекватного описания поверхности отклика в широком интервале варьирования факторов и очень большого числа опытов [7]. Кроме того, для решения подобных задач полный факторный эксперимент (реализуются все возможные сочетания уровней факторов) может успешно применяться только тогда, когда исследователь уже находится в области оптимальных условий протекания операции.

Для изучения поверхности отклика был использован Метод Бокса и Уилсона, он родственен методам итерационной стратегии. Исследователь в этом случае вначале ставит небольшую серию опытов для локального описания малого участка поверхности отклика полиномом первой степени. Далее он двигается по поверхности отклика в направлении градиента линейного приближения. Такой процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута область экстремума. В этом случае удается достичь концентрации опытов в той части поверхности отклика, которая наиболее интересна.

Известно, что одной из определяющих причин брака при изготовлении электронных узлов методом поверхностного монтажа являются пустоты в паяных соединениях. Параметром каче-

ства исследуемой операции может служить коэффициент

$$\beta = \frac{f}{\gamma_{nc}}, \quad (3)$$

где γ_{nc} – количество пустот в паяных соединениях; f – технологический коэффициент.

Основные параметры режимов пайки приведены в табл. 1. Нанесение пасты было отнесено к технологическому фактору. Операции оплавления. Отбор факторов проводился методом экспертных оценок [8].

Задача состояла в том, чтобы определить режим операции оплавления паяльной пасты, обеспечивающий максимум коэффициента β , т. е. минимум пустот в ЭС. Для этого необходимо отыскать уравнение связи параметра качества операции с параметрами режима. Так как количество влияющих факторов велико, а для получения необходимой информации можно ограничиться линейным коэффициентом регрессии, то число опытов многофакторного эксперимента можно снизить, используя дробные реплики от полного факторного эксперимента. Уравнение регрессии в этом случае запишется следующим образом:

$$\beta = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_6x_6, \quad (4)$$

где b_0, b_1, \dots, b_6 – коэффициенты регрессии, значения которых определяются по формуле:

$$b_p = \frac{\sum_{j=1}^N x_{pj}\beta_j}{N}, \quad (5)$$

где $p = 1, 2, \dots, 6$ – номер фактора; N – число опытов дробного факторного эксперимента (ДФЭ); x_p – нормированное значение p -го фактора.

Таблица 1

Параметры режимов, при которых осуществляется пайка

Технологический фактор	Параметр	Значение параметра
X_1	Время предварительного нагрева	50 с
X_2	Скорость нарастания температуры	0,8 °С /с
X_3	Общее время пайки	4 мин
X_4	Скорость нанесения пасты (перемещения ракеля)	70 мм/с
X_5	Время оплавления	60 с
X_6	Пиковая температура оплавления	215 °С

Нормированное значение любой из переменных определялось из формулы:

$$x_p = \frac{X_p - X_{p0}}{I_p}, \quad (6)$$

где X_{p0} – исходное значение фактора; I_p – интервал варьирования фактора.

При многофакторном планировании каждый из исследуемых факторов может принимать один из фиксированных уровней. Для получения уравнения регрессии первой степени достаточно варьировать факторы на двух уровнях. В табл. 2 приведены условия линейного многофакторного эксперимента, а в табл. 3 – матрица планирования дробного факторного эксперимента (ДФЭ).

В каждом опыте производится оплавление пасты на восьми платах, а измерение его пустот выполняется в десяти распределенных по плате точках, после чего определяется β для единичного опыта. Поскольку изменение величины β носит случайный характер, необходимо в каждой точке факторного пространства (X_1, X_2, \dots, X_6)

проводить ряд параллельных опытов, что даст возможность определить ошибку единичного измерения, необходимую для проверки воспроизводимости процесса и адекватности модели. Результаты наблюдений усреднялись по формуле:

$$\beta = \frac{\sum_{l=1}^m \beta_{gl}}{m}, \quad (8)$$

где g – номер точки факторного пространства; m – число параллельных опытов.

Результаты рандомизированных во времени опытов вычислялись по формуле:

$$\sigma_\beta^2 = \frac{\sum_{l=1}^m (\beta_{gl} - \bar{\beta}_g)^2}{m - 1}, \quad (9)$$

Воспользовавшись уравнением (5), определяем коэффициенты регрессии.

Оценка значимости коэффициентов регрессии производилась по критерию Стьюдента. Для этого по формуле

Таблица 2

Условия линейного многофакторного эксперимента

Технологический фактор	Нулевой уровень	Уровень факторов -1	Уровень факторов +1	Шаг варьирования
X_1	50 с	30 с	70 с	20 с
X_2	0,8 °C /с	0,6 °C	1,0 °C /с	0,2 °C /с
X_3	4 мин	3 мин	5 мин	1 мин
X_4	70 мм/с	50 мм/с	90 мм/с	20 мм/с
X_5	60 с	30 с	90 с	30 с
X_6	215 °C	200 °C	230 °C	15 °C

Таблица 3

Матрица планирования ДФЭ

Номер опыта	Технологические факторы					
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1
3	1	+1	-1	-1	+1	1
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1
5	1	-1	+1	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1
7	1	+1	+1	-1	-1	+1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1

$$\sigma_{\beta}^2 = \frac{1}{mN} \sum_{g=1}^N \sigma_{\beta}^2, \quad (10)$$

определяли ошибку единичного опыта. Дисперсия коэффициентов регрессии определялась по формуле

$$\sigma_{\beta}^2 = \sigma_{\beta_0}^2 = \sigma_{\beta_1}^2 = \dots = \sigma_{\beta_6}^2 = \frac{\sigma_{\beta}^2}{N}. \quad (11)$$

Далее для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $\nu_{3\alpha} = N(m - 1) = 32$ определяли табличное значение критерия $t_{кр} = 2,04$.

Коэффициенты регрессии значимы, если $b_p > b_{кр}$, поэтому коэффициенты b_4, b_5, b_6 значимы, а остальные незначимы.

Отсюда уравнение регрессии имеет вид:

$$\beta = 14,8 + 3,24x_4 + 1,82x_5 + 2,51x_6. \quad (12)$$

Для проверки адекватности описания результатов эксперимента на основании полученного уравнения регрессии определим расчетные значения результатов каждого опыта. Критерием адекватности является выполнение условия [6]:

$$F_p < F_{кр}, \quad (13)$$

где F_p – расчетное значение коэффициента Фишера.

$$F_p = \frac{\sigma_{од}^2}{\sigma_{\beta}^2}. \quad (14)$$

Остаточная дисперсия $\sigma_{од}^2$ определялась по формуле:

$$\sigma_{од}^2 = \frac{1}{N - k - 1} \sum_{p=1}^N (\beta_a - \beta_p)^2, \quad (14)$$

где k – число факторов.

Таблица 4

План и результаты эксперимента

Технологические факторы	X_4	X_5	X_6	β
Коэффициент регрессии	3,24	1,82	2,51	–
Исходное значение	70 мм/с	60 с	215 °С	62,5
Шаг фактора	5 мм/с	10 с	5 °С	–
Опыт 1	75 мм/с	70 с	220 °С	64,2
Опыт 2	80 мм/с	80 с	225 °С	71,6
Опыт 3	85 мм/с	90 с	230 °С	91,9
Опыт 4	90 мм/с	100 с	235 °С	76,4
Опыт 5	95 мм/с	110 с	240 °С	48,6

Если $F_p < F_{кр}$, то уравнение регрессии является адекватным.

После описания локальной области факторного пространства полиномом первой степени согласно методике Бокса и Уилсона осуществляли движение по поверхности отклика в направлении градиента линейного приближения. План эксперимента и его результаты приведены в табл. 4, факторы X_1, X_2, X_3 стабилизированы на нулевом уровне.

Из полученных результатов видно, что максимум параметра качества достигается при значениях факторов X_4, X_5, X_6 , соответствующих уровням +1, как в опытах 1 и 8 первой серии экспериментов. Параметр качества β увеличился в результате оптимизации режима операции с 62,5 до 91,1.

Достижение максимальной величины параметра β обеспечивает уменьшение пустот, а значит уменьшение брака электронных узлов (ЭУ).

Этот метод позволяет оптимизировать все технологические операции поверхностного монтажа компонентов, тем самым существенно повысить процент выхода годных ЭУ, величина которого в значительной степени будет зависеть от уровня конкретного производства.

Заключение

Проведен анализ технологического процесса монтажа BGA-компонентов с шариковыми выводами на многослойную печатную плату из FR4. Установлено, что наиболее критическими операциями являются нанесение паяльной пасты и пайка оплавлением. Выявлено 6 основных

факторов, влияющих на качество ПС в процессе парофазной пайки. Методом дробного факторного эксперимента проведено построение математической модели в виде уравнения регрессии. Оценена значимость коэффициентов регрессии проводилась по критерию Стьюдента. Наиболее значимыми факторами оказались скорость нанесения пасты, время оплавления и пиковая температура оплавления. Для проверки адекватности модели использовали коэффициент Фишера. Движение по поверхности отклика в направлении градиента линейного приближения позволило достичь области экстремума и увеличить критерий качества ПС на 47 %.

Список литературы

1. Медведев А.М. Технологическое обеспечение надежности межсоединений // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 5. С. 60–62.
2. Иванов А.В., Пиганов М.Н. Оценка качества паяных соединений электронных узлов // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 4(7). С. 1381–1386.
3. Обеспечение качества и надежности электронных узлов космической аппаратуры в процессе поверхностного монтажа / М.Н. Пиганов [и др.] // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: сборн. науч. тр. Украина, Одесса: Черноморье, 2010. Т. 7. С. 29–35.
4. Пиганов М.Н. Технологические основы обеспечения качества микросборок. Самара: СГАУ, 1999. 231 с.
5. Рыжков Э.В. Оптимизация технологических процессов. Киев: Наукова Думка, 1989. 192 с.
6. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
7. Маркова Е.В., Лисенков А.Н. Планирование эксперимента в условиях неоднородностей. М.: Наука, 1973. 220 с.
8. Тюлевин С.В., Пиганов М.Н. Экспертные оценки в управлении качеством электронных средств: учеб. пособие. Самара: СГАУ, 2015. 119 с.

Modeling of the soldering process for components of radio-electronic units of on-board equipment

S.V. Tyulevim

The technological route for the production of radio electronic printed units is considered. Determined that the most critical operation is reflow soldering in the vapor-gas phase. The most significant factors of this operation are revealed by the method of expert evaluation. To construct a mathematical model a fractional factor experiment was carried out. The regression equation is obtained and carried out its verification for adequacy. A motion was made along the response surface in the direction of the gradient of the linear approximation until the area of the extremum was reached. In this case, an increase in the quality criterion has been achieved.

Keywords: radioelectronic printing unit, onboard equipment, soldering, reflow, fractional factor experiment, mathematical model, regression equation, adequacy, quality factor.
