

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ОПЕРАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ НА НАДЕЖНОСТЬ МОНТАЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Введение

Сварочные процессы протекают по сложным физико-химическим законам при высокой температуре. Совокупность различных факторов и явлений определяет качество микросварных соединений. Особенно сильно это влияние сказывается при операции ультразвуковой сварки при монтаже микроэлектронных изделий на гибкую коммутационную плату, что является причиной снижения качества и работоспособности конструкции и приводит к ее разрушению.

Оптимизация технологической операции ультразвуковой микросварки (УЗ-микросварки), за счет выбора определенного сочетания технологических параметров процесса микромонтажа, является эффективным методом повышения прочности и надежности сварных микросоединений [1].

Цель проведенных исследований – разработка регрессионной модели процесса монтажа МЭИ посредством УЗ-микросварки и оценка ее параметров по результатам полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа 2^3 , определение оптимальных режимов, которые обеспечивают максимальную надежность монтажных соединений. В качестве критерия оценки надежности микросоединений выбрана их прочность на отрыв.

Постановка задачи исследования

Основными достоинствами метода моделирования процессов при помощи факторного эксперимента являются простота и возможность отыскания экстремальной точки (с какой-то погрешностью), если неизвестная поверхность достаточно гладкая и нет локальных экстремумов.

Экспериментальные исследования проведены на базе технологических мощностей предприятий НВП «Хартрон-Энерго» (г. Харьков) совместно с ведущими специалистами данных организаций в рамках программы исследований предприятия.

Материалом для экспериментальных исследований выбран двухслойный алюминий-полиимидный тестовый образец гибкой коммутационной платы (ГКП), основные конструктивные параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Конструктивные параметры тестового образца	Значение
Габаритные размеры ГКП:	
- длина, мм	70
- ширина, мм	140
- толщина, мкм	50
Ширина проводников:	
- нижнего слоя, мкм	210
- верхнего слоя, мкм	100
Шаг между проводниками:	
- нижнего слоя, мкм	300
- верхнего слоя, мкм	200

Качество и надежность получаемых монтажных соединений $y(x)$ в основном зависит от следующих технологических режимов (факторов) [2]:

- выходной мощности УЗ-генератора x_1 (Вт);
- времени сварки x_2 (мс);
- усилия, прилагаемого к рабочему инструменту x_3 (г).

Поставлена задача нахождения математического описания процесса монтажа в окрестностях базовой точки с координатами $x_{01}=2 \text{ Вт}$, $x_{02}=350 \text{ мс}$, $x_{03} = 40 \text{ г}$, с использованием ПФЭ.

Решение общей задачи можно разбить на несколько этапов:

- вычисление построчного среднего значения функции отклика и дисперсий отклика в каждой точке плана эксперимента;
- проверка однородности построчных дисперсий;
- определение коэффициентов математической модели;
- определение дисперсии воспроизводимости;
- оценка статистической значимости коэффициентов модели;
- оценка адекватности модели и данных экспериментов, формирование выводов о возможности применения разработанной модели;
- оптимизация модели процесса монтажа.

ПФЭ проводили при заданных начальных условиях, приведенных в табл.2.

Таблица 2

Характеристика плана эксперимента	$x_1 \text{ (Вт)}$	$x_2 \text{ (мс)}$	$x_3 \text{ (г)}$
Основной уровень	2	350	40
Интервал варьирования	1	100	20
Верхний уровень	3	450	60
Нижний уровень	1	250	20
Область допустимых значений факторов	(0,025÷16)	(0,15÷0,55)	(15÷80)

На основе исходных данных (табл. 1-2) и результатов натуральных испытаний построена матрица планирования ПФЭ 2^3 , представленная в виде табл. 3.

Таблица 3

Номер-точка плана	Факторы эксперимента (режимы УЗ-сварки)								Отклики (прочность монтажных соединений)			
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_{1i}	y_{2i}	y_{3i}	\bar{y}_i
1	+	-	-	-	+	+	+	-	16	16,5	16,8	16,43
2	+	-	-	+	+	-	-	+	18,5	18,3	18,9	18,57
3	+	-	+	-	-	+	-	+	15,9	16,3	16,7	16,3
4	+	-	+	+	-	-	+	-	18,9	18,4	19	18,77
5	+	+	-	-	-	-	+	+	15,9	16	16,2	16,04
6	+	+	-	+	-	+	-	-	19,3	19,5	19,8	19,54
7	+	+	+	-	+	-	-	-	17	17,2	17,5	17,24
8	+	+	+	+	+	+	+	+	19,9	20	20,4	20,1

Произведены вычисления построчного среднего значения функции отклика и дисперсий отклика в каждой точке плана эксперимента. Для любой i -й точки среднее значение выходной величины вычисляется по формуле (1)

$$\bar{y}_i = \sum_{u=1}^m \tilde{y}_{iu} / m. \quad (1)$$

Построчная дисперсия выходной величины определяется выражением (2)

$$S^2\{y_i\} = \sum_{u=1}^m (y_{iu} - \bar{y}_i)^2 / (m-1). \quad (2)$$

Результаты расчета среднего значения выходной величины \bar{y}_i в каждой точке (для каждой строки $m=3$) приведены в табл.3.

Определена построчная дисперсия выходной величины \bar{y}_i в каждой точке (для каждой строки $m=3$):

$$S^2\{y_1\} = 0,1634; S^2\{y_2\} = 0,0934; S^2\{y_3\} = 0,16; S^2\{y_4\} = 0,1034; S^2\{y_5\} = 0,0234; \\ S^2\{y_6\} = 0,0634; S^2\{y_7\} = 0,0634; S^2\{y_8\} = 0,07.$$

Определено расчетное значение коэффициента Кохрэна [3]

$$G_p = S^2\{y_i\}_{\max} / \sum_{i=1}^N S^2\{y_i\}. \quad (3)$$

Сравнение расчетного значения коэффициента Кохрэна с критическим значением G - критерия G_T [3 - 4] показало, что т.к. условие $G_p < G_T$ выполняется, можно сделать вывод об однородности всех построчных дисперсий с выбранным уровнем статистической значимости $\alpha=0,05$.

Проверив построчные дисперсии на однородность, определили оценки коэффициентов модели по формуле

$$b_k = \sum_{i=1}^N \tilde{y}_{ik} x_{ik} / N. \quad (4)$$

где k – номер вектор-столбца (табл. 1).

Вычислены коэффициенты

$$b_0 = 17,87; b_1 = 0,3563; b_2 = 0,2288; b_3 = 1,3713; b_{12} = 0,2113; b_{13} = 0,2188; b_{23} = -0,0388; \\ b_{123} = -0,1213.$$

Оценка дисперсии воспроизводимости (оценка усредненных построчных дисперсий) в соответствии с результатами вычислений определялась согласно выражению

$$S_B^2 = \sum_{s=1}^N S^2\{y_i\} / N, \quad (5) \\ S_B^2 = 0,0926.$$

Дисперсия коэффициента b_k определяется с учетом свойства нормировки, оценки коэффициентов найдены с одинаковой дисперсией:

$$S^2\{b_k\} = S_B^2 / N \cdot m, \quad (6)$$

$$S^2\{b_k\} = 0,0926 / 8 \cdot 3 = 0,0039; S\{b_k\} = 6 \cdot 10^3 = 0,0624.$$

Оценка статистической значимости коэффициентов модели произведена по критерию Стьюдента. Влияние k -го фактора, отклонение k -го коэффициента от нуля учитывается следующим коэффициентом [3]

$$t_k = |b_k| / S\{y_i\}. \quad (7)$$

При выбранном уровне статистической значимости ($\alpha=0,05$) по таблицам Стьюдента [4] найдено табличное значение коэффициента t_T . Нуль-гипотеза будет принята в том случае, если будет выполняться неравенство

$$t_k < t_T. \quad (8)$$

Расчетные значения коэффициента Стьюдента t_k для найденных оценок коэффициентов b_k : $t_0 = 286,38$; $t_1 = 5,71$; $t_2 = 3,67$; $t_3 = 21,98$; $t_{12} = 3,39$; $t_{13} = 3,51$; $t_{23} = 0,62$; $t_{123} = 1,94$.

Неравенство (8) выполняется только для коэффициентов t_{23} и t_{123} . Следовательно, можно предположить, что они являются статистически незначимыми и их следует исключить из уравнения регрессии.

Таким образом, уравнение регрессии технологической операции УЗ-микросварки, содержащее статистически значимые коэффициенты, будет (в кодированной системе) иметь вид

$$\hat{y} = 17,87 + 0,3563x_1 + 0,2288x_2 + 1,3713x_3 + 0,2113x_1x_2 + 0,2188x_1x_3. \quad (9)$$

Полученное уравнение регрессии проверено на адекватность исследуемому объекту при помощи критерия Фишера [3]. Результаты проверки показали, что полученная модель (9) является адекватной и достаточно хорошо аппроксимирует экспериментальные данные.

Оптимизация процесса УЗ-микросварки

Оптимизация процесса микросварки представляет собой целенаправленный поиск значений влияющих факторов, при которых достигается экстремум критерия оптимальности (с учетом ограничений, наложенных на все влияющие факторы и функции отклика).

Существует несколько методов оптимизации результатов факторного эксперимента [3, 5, 6]. Наиболее простым, наглядным и точным является так называемый метод «крутого восхождения».

Анализ результатов ПФЭ показывает, что для дальнейшей оптимизации процесса микромонтажа применение метода «крутого восхождения» будет эффективным, так как полученная линейная модель (9) адекватна и не является резко асимметричной относительно коэффициентов.

Расчет методом «крутого восхождения» проведен в несколько последовательных этапов.

На первом этапе рассчитана величина шага движения по градиенту прочности монтажных сварных соединений. Расчет произведен по стандартной методике, исходя из значений коэффициентов регрессии [1].

С этой целью переход к новому натуральному масштабу интервалов варьирования осуществлен с помощью формулы

$$L_i = b_i \delta_i, \quad (10)$$

где b_i – коэффициенты регрессии; δ_i – единицы варьирования.

Рассчитано, что $L_1 = 0,36$; $L_2 = 23$; $L_3 = 27,4$. Абсолютная величина $|L_{\max}|$ имеет наибольшее значение для фактора погружение рабочего инструмента, следовательно, этот фактор принят в качестве базового. Для остальных факторов новые коэффициенты рассчитывают по формуле

$$\gamma_i = \frac{L_i}{L_{\max}}, \quad (11)$$

где γ_i – новые коэффициенты при значимых факторах.

Рассчитанные коэффициенты составлены для факторов:

- мощность УЗ-генератора – $\gamma_1 = 0,01$;
- время сварки – $\gamma_2 = 0,84$;
- нагрузка рабочего инструмента – $\gamma_3 = 1$.

На следующем этапе для базового фактора (x_3) выбран модуль шага движения по градиенту (h_i). Учитывая, что $\delta_{\text{баз.3}} = 20$, принимаем $h_{\text{баз.3}} = 18$. Далее рассчитываются шаги движения остальных факторов:

$$h_i = h_{\text{баз.3}} \gamma_i \quad (12)$$

Округляя значения h_1, h_2 , получим следующие шаги движения по градиенту: $h_1=0,18$; $h_2=15,12$.

На последнем этапе рассчитаны условия и результаты опытов «крутого восхождения» (мысленных опытов) по модели (9). Значения факторов, определяющих условия опытов, определяются по формуле

$$X_{ji} = X_{j-1,i} + h_i, \quad (13)$$

где j – номер опыта; i – номер фактора.

Результаты расчета условий мысленных опытов приведены в табл. 4

Таблица 4

Характеристика плана эксперимента	x_1	x_2	x_3
Интервал варьирования (δ_i)	1	100	20
Базовый (основной) уровень	2	350	40
Коэффициент регрессии (b_i)	0,3563	0,2288	1,3713
Произведение $L_i = b_i \delta_i$	0,36	23	27,4
Коэффициент (γ_i)	0,01	0,84	1
Шаг движения (h_i)	0,18	15,12	18
Область допустимых значений факторов	(0,025÷16)	(0,15÷0,55)	(15÷80)

Движение по градиенту считали эффективным, если реализация мысленных опытов, рассчитанных на стадии «крутого восхождения», приводит к увеличению значения параметра оптимизации (прочности монтажных соединений) по сравнению с наилучшим результатом в матрице полного факторного эксперимента. Режимы ТО УЗ-сварки и прочность сварных монтажных соединений, выявленная в результате мысленных и реализованных опытов методом «крутого восхождения» приведены в табл. 5.

Таблица 5

№ опыта	x_1	x_2	x_3	Умысл.	Уреал.
1	2,18	365,12	58	26,5	25,7
2	2,36	380,24	76	28,7	27,7
3	2,54	395,36	94	30,9	27,1

Как видно, прочность сварных микросоединений, выявленная в реализованном опыте №2, составила 27,7 г. Кроме того, реализован опыт №3, в котором при движении по градиенту, фактор x_1 достигал границ допустимых значений, при этом значение параметра оптимизации начало уменьшаться, что дало сигнал о прекращении движения по градиенту, т.к. оптимум найден (табл. 5).

Выводы

На основании проведенных исследований можно заключить, что применение метода крутого восхождения в данном случае оказалось эффективным в реализованном опыте №2 (27,7 г), видим, что прочность монтажного соединения увеличивается в 1,34 раза.

В результате эксперимента по плану «крутого восхождения» определены оптимальные режимы УЗ-микросварки: мощность УЗ-генератора 2,5 Вт, время сварки – 380 мс, нагрузка рабочего инструмента – 0,76 Н.



Список литературы: 1. *Невлюдов, И.Ш., Проценко, М.А. и др.* Использование метода планирования экспериментов при оптимизации процесса микромонтажа многослойных конструкций гибких коммутационных структур // *Вісник НТУ «ХП»*. – Харків : НТУ «ХП». – 2012. – Вип. №9. – С. 30-35. 2. *Грачев, А.А.* Ультразвуковая микросварка. – М. : Энергия, 1977. – 184 с. 3. *Саутин, С.Н.* Планирование эксперимента в химии и химической технологии. – М. : Химия, 1975. – 50с. 4. *Налимов, В.В.* Логические основания планирования эксперимента. – М. : Металлургия, 1981. – 155 с. 5. *Моисеев, Н.Н.* Элементы теории оптимальных систем. – М. : Наука, 1975. – 526 с. 6. *Ахназарова, С.Л.* Методы оптимизации эксперимента. – М. : Высш. шк., 1985. – 327 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 04.09.2012