

## 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  $x_{01}=2 \text{ Вм}$ ,  $x_{02}=350 \text{ мс}$ ,  $x_{03} = 40 \text{ з}$ , с использованием ПФЭ.

Решение общей задачи можно разбить на несколько этапов:

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

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

Таблица 2

Характеристика плана эксперимента	$x_1 \text{ (Вм)}$	$x_2 \text{ (мс)}$	$x_3 \text{ (з)}$
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

Но- мер- точки 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

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

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;  $\delta_i$  – 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  $\gamma_i$  – новые коэффициенты при значимых факторах.

Рассчитанные коэффициенты составлены для факторов:

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

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

$$h_i = h_{\dot{a}\dot{a}\dot{c},3} \gamma_i \quad (12)$$

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 ( $\delta_i$ )	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 ( $\gamma_i$ )	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*