

И.Ш. НЕВЛЮДОВ, докт.техн.наук, проф., ХНУРЭ, Харьков,
М.А. ПРОЦЕНКО, вед.спец., нач.отд., ГП «НИИ Технологический институт приборостроения», Харьков,
И.С. ХАТНЮК, асп., ХНУРЭ, Харьков,
Л.С. ФЕДОСЕЕВ, маг., ХНУРЭ, Харьков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МИКРОМОНТАЖА МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИБКИХ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

У роботі розглядається процес оптимізації технологічної операції УЗ-мікрозварювання з використанням методів математичного планування експерименту, аналізується вплив технологічних чинників на міцність зварних мікроз'єднань.

Ключові слова: зварне мікроз'єднання, планування експерименту, міцність, чинники, оптимізація.

В работе рассматривается процесс оптимизации технологической операции УЗ-микросварки с использованием методов математического планирования эксперимента, анализируется влияние технологических факторов на прочность сварных микросоединений.

Ключевые слова: сварное микросоединение, планирование эксперимента, прочность, факторы, оптимизация.

In this paper the process of US-bonding operation optimization using mathematical experiment planning methods is considered, the influence of technological factors on the microbonds mechanical strength formation is analyzed.

Keywords: microbond, experiment planning, mechanical strength, factors, optimization.

Введение

В производстве многослойных конструкций гибких коммутационных структур (ГКС) широко используются технологические процессы сборки и монтажа. Ультразвуковая микросварка (УЗ-микросварка) является одним из основных методов формирования межсоединений металлических проводников благодаря целому ряду ценных технологических свойств [1-2]. Для обеспечения качества ГКС, особенно в микроэлектронном исполнении, существует потребность в воспроизводимости требуемых конструктивно-технологических характеристик сварных микросоединений, так как процесс образования монтажного соединения характеризуется сложным взаимодействием технологических факторов (мощности ультразвукового генератора, сварочного усилия и времени сварки).

Оптимизация технологической операции УЗ-микросварки, за счёт выбора определённого сочетания технологических параметров процесса микромонтажа, является эффективным методом повышения прочности и надёжности сварных микросоединений [1]. Оптимальные режимы ТО могут быть определены двумя способами: методом эмпирического подбора и с использованием методов математического планирования эксперимента [3].

Планирование эксперимента позволяет варьировать одновременно все факторы (параметры) технологического процесса и получать количественные оценки как основных факторов, так и эффектов взаимодействия между ними, причем получаемые результаты характеризуются меньшей ошибкой, чем традиционные методы однофакторного исследования [4].

Методика проведения исследований

Для экспериментальных исследований взят двухслойный алюминий-полиимидный тестовый образец двухслойной гибкой коммутационной платы (ТО ДГП), основные технические характеристики которого приведены в таблице 1.

Формирование сварных микросоединений осуществлялось на механизированной установке УС.ИММ-1, сварочным инструментом типа ИУ1-130 [2].

Тестовый образец коммутационной платы изготовлен в условиях действующего производства с применением автоматического ультразвукового сварочного оборудования и склеивания составных верхней и нижней гибких плат.

Таблица 1. Конструктивные параметры тестового образца гибкой коммутационной платы

Конструктивные параметры	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

Прочность получаемых сварных микросоединений, обозначенная как y (г), в основном зависит от следующих технологических режимов (факторов): выходной мощности УЗ-генератора x_1 (ед), времени сварки x_2 (ед), усилия, прилагаемого к рабочему инструменту x_3 (г). Необходимо с помощью ПФЭ найти математическое описание операции сварки, в окрестностях точки с координатами $x_{01}=3.4$ ед, $x_{02}=70$ ед, $x_{03}=26$ г.

Решение общей задачи исследования было разбито 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; адекватности модели и данных экспериментов, формирование выводов о возможности применения разработанной модели;

оптимизация технологической операции УЗ-микросварки при помощи одного из методов оптимизации.

Проведение факторного эксперимента и анализ полученных результатов

Предварительными исследованиями определено, что на величину механической прочности сварных микросоединений в основном оказывают влияние три фактора процесса монтажа: мощность ультразвукового генератора, сварочное усилие и время сварки.

В планируемых экспериментах требовалось достигнуть оптимума прочности микросоединений при принятых ограничениях на основные технологические факторы УЗ-микросварки (таблица 2).

Таблица 2. Основные характеристики плана эксперимента

Характеристика	x_1 , ед	x_2 , ед	x_3 , Г
Основной уровень	3,4	70	26
Интервал варьирования	0,8	20	8
Верхний уровень	4,2	90	34
Нижний уровень	2,6	50	18
Область допустимых значений факторов	(0÷10)	(0÷90)	(0÷40)

Для построения математической модели операции УЗ-микросварки реализован полный факторный эксперимент (ПФЭ 2^3). Верхний и нижний уровни (таблица 2) устанавливались экспериментально при проведении предварительных однофакторных опытов. Исходя из значений этих параметров определялся центр плана и шаг варьирования. В безразмерной системе координат верхний уровень выражался как (+1), нижний уровень $-(-1)$, координаты центра плана приравнивались к нулю.

Количество опытов рассчитывалось по формуле

$$N=n^k, \quad (1)$$

где k – число факторов, n – количество уровней, то есть для двухуровневого полнофакторного эксперимента $N = 2^3$.

Таким образом, план ПФЭ 2^3 позволил исследовать 8 вариантов технологической операции УЗ-микросварка с одновременным варьированием всех трёх факторов на двух уровнях: верхнем (+1) и нижнем (-1), среднее арифметическое между верхним и нижним уровнями представляет собой средний уровень.

Матрица планирования полного факторного эксперимента для рассмотренных трёх факторов представлена в табл. 3. Нулевой фактор (x_{0i}) характеризует неучтенные факторы, влияющие на параметр оптимизации, и необходим для определения свободного члена уравнения регрессии b_0 . Результаты эксперимента в каждой из серий испытаний представлены в столбцах y_1, y_2, y_3 , их среднее значение – в столбце \bar{y}_i . Для определения коэффициентов взаимодействия, матрица планирования была расширена дополнительными столбцами, учитывающими эффект двойного и тройного взаимодействия

факторов. Эффекты взаимодействия определялись аналогично линейным эффектам [4-5].

Проверка показала, что экспериментальные данные являются нормально распределенными и однородными.

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по методу наименьших квадратов.

Таблица 3. Матрица планирования ПФЭ 2^3

№ точки и плана	Факторы эксперимента (режимы УЗ-микросварки)								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	+	-	-	-	+	+	+	-	12	13	10	11,67
2	+	-	+	+	-	-	+	-	15	14	13	14
3	+	-	+	-	-	+	-	+	10	13	15	12,67
4	+	-	-	+	+	-	-	+	12	8	10	10
5	+	+	-	-	-	-	+	+	21	18	22	20,33
6	+	+	-	+	-	+	-	-	24	18	22	21,34
7	+	+	+	-	+	-	-	-	16	17	19	17,34
8	+	+	+	+	+	+	+	+	22	21	18	20,34

Любой коэффициент уравнения регрессии определяется скалярным произведением столбца y на соответствующий столбец, отнесенным к числу опытов в матрице планирования N (табл. 3)

$$b_i = \sum_{i=1}^N \bar{y}_{ik} x_{ik} / N \quad (2)$$

где b_i – коэффициент регрессии, N – число возможных комбинаций; x_{ik} – значение переменной в соответствующем столбце, \bar{y}_{ik} – среднее значение отклика (прочности микросоединения).

В соответствии с данными табл. 3 рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии. Величина коэффициента регрессии (b_k) характеризует вклад каждого фактора (x_i) технологической операции УЗ-микросварки в значение уровня качества (прочности) (y_i) сварного микросоединения.

Полученное уравнение регрессии имело следующий вид:

$$\hat{y} = 15,96 + 3,88x_1 + 0,13x_2 + 0,46x_3 - 1,12x_1x_2 + 0,54x_1x_3 + 0,62x_2x_3 - 0,13x_1x_2x_3.$$

Полученные данные свидетельствуют о том, что усилие мощность УЗ-генератора (амплитуда УЗ-колебаний) существенно влияет на прочность получаемого микросоединения.

Значимость коэффициентов регрессии проверялась по критерию Стьюдента [3-4]. Дисперсия воспроизводимости коэффициентов регрессии составила 4,25. Коэффициенты регрессии считали отличными от нуля, если выполнялось следующее неравенство:

$$|b_i| > t_{0,05}(f)S\{b_i\}, \quad (3)$$

где f – число степеней свободы, $t_{0,05}$ – критерий Стьюдента при 5 % уровне значимости, который находится по таблице [5].

Полученные результаты расчёта свидетельствуют о том, что следует признать значимыми коэффициенты b_0, b_1, b_{12} и включить их в модель, а коэффициенты $b_2, b_3, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ незначимы и их следует отбросить, не включая в искомую модель. На основании полученных данных математическая модель (уравнение регрессии), включающая только значимые коэффициенты, приобрела следующий вид

$$\hat{y} = 15,96 + 3,88x_1 - 1,12x_1x_2. \quad (4)$$

Проверка адекватности полученной модели проведена с использованием F -критерия Фишера [3-4]. Расчётное значение коэффициента Фишера $F_p=2,36$ оказалось меньше табличного $F_T=2,85$, что доказало адекватность найденной модели.

На основании результатов проведенного ПФЭ можно предположить, что для дальнейшей оптимизации операции УЗ-микросварки применение метода «крутого восхождения» [4-5] будет эффективным, так как полученная линейная модель адекватна и не является резко асимметричной относительно коэффициентов.

На следующем этапе исследований расчет крутого восхождения проведен в следующей последовательности.

1) Величина шага движения по градиенту прочности сварных микросоединений рассчитана по стандартной методике, исходя из значений коэффициентов регрессии [2-5].

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

$$L_i = b_i \delta_i, \quad (5)$$

где b – коэффициенты регрессии, δ_i – единицы варьирования.

Рассчитано, что $L_1 = 3,1, L_2 = 2,6, L_3 = 3,68$. Абсолютная величина $|L_{max}|$ принимало наибольшее значение для фактора нагружение рабочего инструмента, следовательно, этот фактор был принят в качестве базового. Для остальных факторов новые коэффициенты рассчитывались по формуле

$$\gamma_i = L_i / |L_{max}|, \quad (6)$$

где γ_i – новые коэффициенты при значимых факторах.

Рассчитанные коэффициенты составили для факторов: мощность УЗ-генератора, время сварки, нагружение рабочего инструмента соответственно: $\gamma_1 = 0,84, \gamma_2 = 0,71, \gamma_3 = 1$.

2) Для базового фактора (x_3) выбран модуль шага движения по градиенту ($h_{баз.}$). Шаг движения не должен превышать интервала варьирования по базовому фактору $h_{баз.} = \delta_{баз.}$. Поэтому, в нашем случае, учитывая, что $\delta_{баз.3} = 8$, приняли, что $h_{баз.} = 2$. Далее были рассчитаны шаги движения остальных факторов (h_i) по формуле: $h_i = h_{баз.} \gamma_i$. Округлив значения h_1, h_2 , получили следующие шаги движения по градиенту: $h_1 = 1,7; h_2 = 1,4$.

3) Рассчитаны условия и результаты опытов крутого восхождения (мысленных опытов). Значения факторов, определяющие условия опытов, определены по формуле

$$X_{ji} = X_{j-1,i} + h_i, \quad (7)$$

где j – номер опыта, i – номер фактора. Результаты мысленных опытов (y_{jm}) рассчитаны по модели (7) для X_{ji} , вычисленных по формуле $X_{ji} = X_{j-1,i} + h_i$.

Движение по градиенту считали эффективным, если реализация мысленных опытов, рассчитанных на стадии крутого восхождения, приводила к увеличению значения параметра оптимизации (прочности сварных микросоединений) по сравнению с наилучшим результатом в матрице полного факторного эксперимента (табл. 4).

Как видно из табл. 4, прочность сварных микросоединений, выявленная в реализованном опыте № 1, составила 27 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 начиная со второго опыта, что дало сигнал о прекращении движения по градиенту т.к оптимум был найден (табл. 4).

Таблица 4. Режимы ТО УЗ-микросварка и прочность сварных микросоединений, выявленная в результате мысленных и реализованных опытов методом «крутого восхождения»

№ опыта	x_1 , ед	x_2 , ед	x_3 , Г	$U_{\text{мысл}}$, Г	$U_{\text{реал}}$, Г
1	3,4	70	26	16	27
2	5,1	71,4	28	15	14
3	6,8	72,8	30	14	13

Выводы

Для оптимизации технологической операции УЗ-микросварки целесообразным, на наш взгляд, является использование метода ПФЭ, позволяющего поставить большое количество опытов, реализовать все возможные комбинации основных уровней независимых переменных факторов среды, установить оптимальные сочетания технологических режимов с учетом их совместного влияния на прочность получаемых микросоединений.

В результате планирования и выполнения факторного эксперимента определены оптимальные режимы для операции УЗ-микросварки: мощность УЗ-генератора – 3,4 ед; время микросварки – 70 ед, нагружение рабочего инструмента – 26 г.

Список литературы: 1. Борцов, В. Н. Исследование и выбор оптимальных технологических режимов сварки для автоматизации монтажа гибких алюминий-полиимидных микрокабелей [Текст] / В. Н. Борцов, И. Ш. Невлюдов, М. А. Проценко, И. Т. Тымчук, И. С. Хатнюк // Технология приборостроения. - 2011. - №1. - С. 3 - 8. 2. Замирец, Н.В. Алюминиевая “Chip on flex” (COF) технология в радиационном приборостроении [Текст] / Н. В. Замирец, В. Н. Борщев, А. М. Листратенко, В. А. Антонова, Л. П. Семенов, М. А. Проценко, И. Т. Тымчук // Технология приборостроения. - 2007. - №2. - С.3-9. 3. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. - М. : Наука, 1976. - 280 с. 4. Саутин, С. Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии [Текст] / С. Н. Саутин. - М.: Химия, 1975. - 50 с. 5. Налимов, В. В. Логические основания планирования эксперимента [Текст] / В. В. Налимов, Т. И. Голикова. - М.: Металлургия, 1981. - 155 с.

Поступила в редколлегию 15.02.2012