

**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  $2^3$

№ точек 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,  $\delta_i$  – 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  $\gamma_i$  – 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