

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ ЗОЛОТЫХ ПРОВОДНИКОВ

Е.С. Голубцова, О.Л. Менделеева, Н.Б. Каледина

*Методом математического планирования эксперимента оптимизирована прочность на отрыв сварного соединения, полученного сваркой давлением золотых проводников со слоем алюминия, напыленного в вакууме на окисленную пластинку кремния. В качестве факторов, влияющих на процесс сварки, в расчете использовались: температура подогрева пластины кремния; максимальное усилие сжатия проводника на поверхности кремния во время сварки; мощность подводимых к пуансону ультразвуковых колебаний и длительность ультразвуковых колебаний.*

*Ключевые слова: микросварка давлением, проводник, алюминий, кремний, математическое планирование эксперимента, температура подогрева, усилие сжатия, мощность, длительность ультразвуковых колебаний, прочность сварных соединений*

Ультразвуковая сварка – сварка давлением, осуществляемая при воздействии ультразвуковых колебаний. Такой вид сварки применяется для соединения деталей, нагрев которых затруднен, при соединении разнородных металлов или металлических материалов с прочными оксидными пленками (алюминий, нержавеющие стали, пермаллой и т.п.)

Исследовали процесс микросварки давлением золотых проводников диаметром 0,025 мм со слоем алюминия, напыленным в вакууме на окисленную пластинку кремния. Этот процесс является одной из операций производства интегральных схем (рисунок 1).

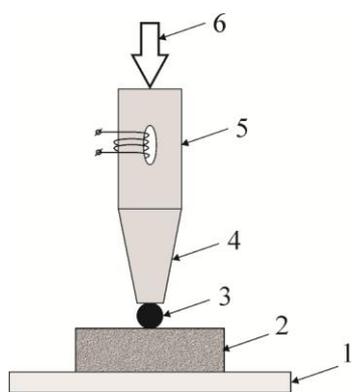


Рисунок 1 - Схема микросварки давлением: 1 – предметный столик паяльника; 2 – кристалл кремния; 3 – золотая проволока; 4 – наконечник; 5 – магнестрикционный пакет; 6 – усилие сжатия проводника при сварке.

Интенсивные исследования механизма процесса микросварки выявили многофакторный характер этого процесса [1, 2]. Предварительный расчет не позволяет определить оптимальные режимы сварки. Учитывая большое рассеяние прочности таких соединений и влияние на прочность сварного соединения случайных отклонений технологии на предыдущих операциях, при выборе режимов микросварки следует применять методы математического планирования эксперимента [3].

В данной работе в качестве параметра оптимизации (функции отклика  $Y$ ) применяли величину усилия отрыва приваренного проводника в направлении, перпендикулярном к поверхности пластины кремния. В качестве существенно влияющих факторов использовали предусмотренные конструкцией сварочной установки способы воздействия на режим сварки:

$X_1$  – температура подогрева пластины кремния (данные милливольтметра термопары);

$X_2$  – максимальное усилие сжатия проводника на поверхности кремния во время сварки (прилагаемая нагрузка);

$X_3$  – мощность подводимых к пуансону ультразвуковых колебаний (режим работы УЗ-генератора);

$X_4$  – длительность ультразвуковых колебаний (данные реле времени).

Прочие факторы (комплекс условий подготовки кремниевых пластин, условия напыления алюминия и термической обработки напыленного слоя, промежутки времени между напылением и сваркой,

сваркой и испытанием на прочность, номер сварной установки, номер оператора установки) поддерживали неизменными.

С учетом рассеивания данных каждый режим сварки повторяем 20 раз ( $n$ ).

Функцию отклика  $Y$  моделировали в виде полинома:

$$Y = b_0 + b_i X_i + b_{ij} X_i X_j + b_{ij\gamma} X_i X_j X_\gamma + b_{ij\gamma k} X_i X_j X_\gamma X_k, \quad (1)$$

где  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ij\gamma}, b_{ij\gamma k}$  – коэффициенты уравнения (1);  $X_i, X_i X_j, X_i X_j X_\gamma, X_i X_j X_\gamma X_k$  – кодированные уровни внешних факторов.

Уровни факторов и интервалы варьирования этих факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Уровни факторов и интервалы варьирования

Уровни и интервалы факторов	Факторы			
	$X_1, ^\circ\text{C}$	$X_2, *10^{-3}, \text{H}$	$X_3, \text{BA}$	$X_4, \text{c}$
Основной уровень $X_i = 0$	100	30	1,188	0,3
Интервал варьирования $\Delta X_i$	25	5	0,189	0,1
Верхний уровень $X_i = +1$	125	35	1,377	0,4
Нижний уровень $X_i = -1$	75	25	0,999	0,2

Матрица планирования, результаты опытов и расчетов представлены в таблице 2 (опыты проводились в случайном порядке).

Оценку дисперсии  $u$ -того опыта проводили по формуле:

$$S_{Y_u}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_{ui} - \bar{Y}_u)^2, \quad (2)$$

где  $n$  - число параллельных опытов в  $u$ -той строке ( $n = 20$ );  $Y_{ui}$  – значение параметра оптимизации в  $i$ -том опыте;  $\bar{Y}_u$  - среднее значение параметра оптимизации в  $u$ -той строке.

Оценку однородности дисперсий  $S_{Y_u}^2$  определяли при числе степеней свободы  $f_1 = n - 1$  и числе суммы дисперсий  $f_2 = N$  с

помощью критерия Кохрена, который определяли по формуле:

$$G_{\max} = \max S_{Y_u}^2 / \sum_{u=1}^N S_{Y_u}^2 \quad (3)$$

В нашем случае  $G_{\max} = 615 \cdot 10^{-4} / 6,272 = 0,0981$ , что меньше  $G_{\text{табл}} = 0,140$  при  $\alpha = 0,05$ ;  $f_1 = 19$  и  $f_2 = 16$ .

Таким образом, гипотеза об однородности дисперсий не отвергается, и мы можем оценить дисперсию воспроизводимости опытов в нашем эксперименте по формуле:

$$S_Y^2 = \sum_{u=1}^N S_{Y_u}^2 / N = \frac{6,272}{16} \approx 0,392. \quad (4)$$

Коэффициенты уравнения регрессии (1) рассчитывали по формулам:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_i Y_u; \quad (5)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{ij} Y_u; \quad (6)$$

$$b_{ij\gamma} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{ij\gamma} Y_u; \quad (7)$$

$$b_{ij\gamma k} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{ij\gamma k} Y_u; \quad (8)$$

В результате расчетов этих коэффициентов были получены следующие значения:  $b_0 = 2,289$ ;  $b_1 = -0,179$ ;  $b_2 = -0,317$ ;  $b_3 = -0,183$ ;  $b_4 = -0,101$ ;  $b_{12} = 0,095$ ;  $b_{13} = -0,04$ ;  $b_{14} = -0,029$ ;  $b_{23} = 0,129$ ;  $b_{24} = 0,04$ ;  $b_{34} = 0,048$ ;  $b_{123} = -0,054$ ;  $b_{124} = 0,018$ ;  $b_{134} = -0,07$ ;  $b_{234} = 0,096$ ;  $b_{1234} = 0,014$ .

Для определения значимости коэффициентов (при  $f_2 = N(n-1) = 16(20-1) = 304$ ) сначала определяем дисперсию по формуле:

Таблица 2 - Матрица планирования и результаты эксперимента N =2<sup>4</sup>

Номер опыта N, u	Кодированные уровни факторов															Опытные данные		Расчетные значения $\hat{Y}$
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	$\bar{Y}_u$ *10 <sup>-3</sup> , Н	S <sup>2</sup> <sub>Y<sub>u</sub></sub>	
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1,76	0,392	1,78
2	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	2,25	0,275	2,08
3	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	1,71	0,394	1,75
4	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	2,49	0,374	2,49
5	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	1,88	0,374	1,62
6	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	1,77	0,361	1,84
7	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	2,57	0,569	2,71
8	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	3,07	0,615	3,12
9	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	1,73	0,458	1,91
10	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	1,95	0,467	1,94
11	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	2,35	0,269	2,89
12	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	2,61	0,378	2,70
13	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	2,20	0,328	2,07
14	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	2,27	0,305	2,24
15	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	2,68	0,379	2,58
16	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	3,33	0,454	3,27
$\Sigma Y$	-2,86	-5,07	-2,92	-1,62	1,52	-0,64	-0,46	2,06	0,64	0,76	-0,86	0,28	-1,12	1,54	0,22	36,62	6,272	

$$S_{b_i}^2 = S_Y^2 / N(n-1) = \frac{0,392}{16(20-1)} = 128,95 * 10^{-5} \quad (9)$$

Тогда  $S_{b_i} = \sqrt{S_{b_i}^2} = 359 * 10^{-4}$ , а  $b_{кр} = tS_{b_i} = 1,968 * 359 * 10^{-4} = 0,07065$ , где  $t$  – табличное значение критерия Стьюдента при  $\alpha = 0,05$  и степенях свободы  $f = 16$ . Следовательно, коэффициенты  $b_{13}$ ,  $b_{14}$ ,  $b_{34}$ ,  $b_{123}$ ,  $b_{124}$  и  $b_{1234}$  незначимы, так как их абсолютная величина меньше  $b_{кр} = 0,0687$ .

В результате модель имеет вид:

$$\hat{Y} = 2,289 - 0,179 X_1 - 0,317 X_2 - 0,183 X_3 - 0,101 X_4 + 0,095 X_1 X_2 + 0,129 X_2 X_3 - 0,07 X_1 X_3 X_4 + 0,096 X_2 X_3 X_4. \quad (9)$$

Проверим адекватность этой модели, определив сначала дисперсию неадекватности по формуле:

$$S_{ad}^2 = \frac{n \sum_{u=1}^N (Y_u - \hat{Y}_u)^2}{N - m}, \quad (10)$$

где  $n$  – число параллельных опытов в  $u$ -той строке;  $Y_u$  – экспериментальное значение параметра оптимизации в  $u$ -той строке;  $\hat{Y}_u$  – расчетное значение этого параметра в  $u$ -той строке;  $N$  – число опытов (строк) в матрице планирования;  $m$  – число значимых коэффициентов, включая  $b_0$  в уравнении (9).

$$\text{Тогда } S_{ad}^2 = \frac{20 * 6,144648}{16 - 9} = 0,413.$$

Модель адекватна, так как отношение дисперсий  $F = 0,413 / 0,392 = 1,054 < F_{\alpha=0,05; f_1=7; f_2=304} = 2,1$ .

В уравнение (9) входят не только линейные члены  $b_i X_i$ , но и парные и тройные взаимодействия факторов. Это означает, что анализируемый процесс сварки является весьма сложной системой.

Наибольшее влияние на этот процесс оказывает второй фактор ( $X_2$ ), т.е. максимальное усилие сжатия проводника на поверхности кремния.

Для наглядности на рисунке 2 показаны расчетные значения средней прочности сварных соединений для трех уровней

мощности ультразвуковых колебаний в интервале ( $-1 \leq X_3 \leq +1$ ).

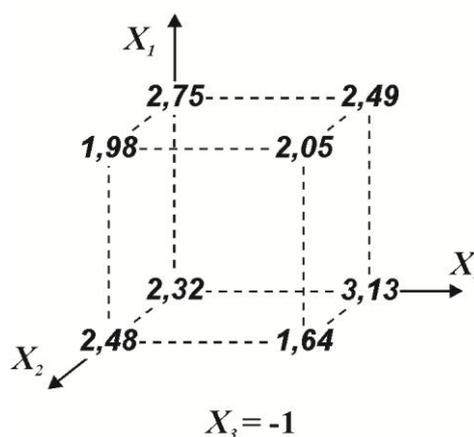
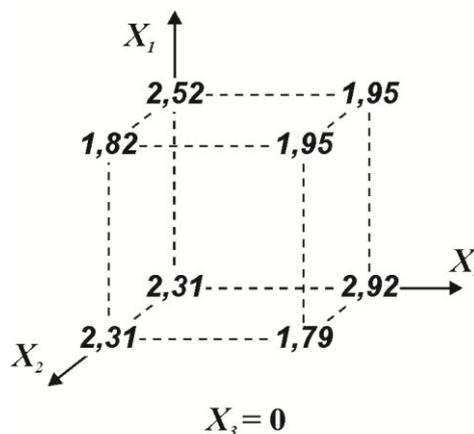
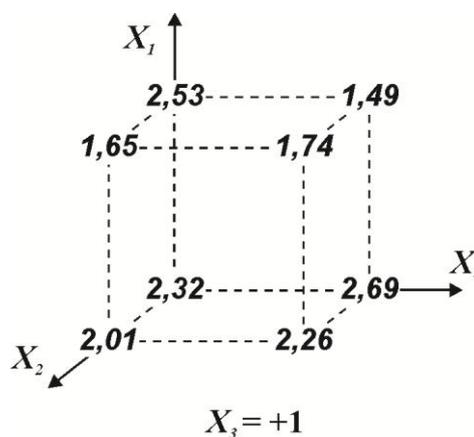


Рисунок 2 - Расчетные значения средней прочности микросварных соединений для трех уровней мощности ( $X_3$ ) ультразвуковых колебаний.

Прочность повышается при одновременном снижении мощности ( $X_3 \rightarrow 0,935$  ВА), температуры ( $X_1 \rightarrow 75$  °С), и давлении ( $X_2 \rightarrow 20...25 \cdot 10^{-3}$  Н).

Модель (У) предсказывает возможность реализации сварного соединения равнопрочного с золотой проволокой.

Чтобы определить оптимальные режимы сварки провели дополнительные опыты и получили следующие результаты после испытаний двадцать соединений для каждого намеченного режима (таблица 3).

Таблица 3 - Прочность сварного соединения, полученного при дополнительных опытах

Номер опыта	Температура подогрева пластины кремния, °С	Максимальное усилие сжатия проводника на поверхности кремния во время сварки, $\cdot 10^{-3}$ Н	Мощность подводимых к пучкуну ультразвуковых колебаний, ВА	Длительность ультразвуковых колебаний, с	Средняя прочность сварного соединения, $\cdot 10^{-3}$ Н	
					прогноз	опыт
17	75	20	0,999	0,4	4,00	3,60
18	75	15	0,999	0,4	4,72	4,24
19	75	20	0,999	0,5	4,26	3,22
20	75	15	0,999	0,2	3,71	2,95

До исследования средняя прочность сварного соединения составляла  $3,33 \cdot 10^{-3}$  Н. В результате оптимизации среднюю прочность сварного соединения удалось повысить на 27% (до  $4,24 \cdot 10^{-3}$  Н).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Россошинский А.А. Микросварка давлением. – Киев: Техника, 1971. - 152 с.
2. Красулин Ю.А. Взаимодействие металла с полупроводником в твердой среде. - Москва: Наука, 1971. - 119 с.
3. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. - Москва: Наука, 1965. - 340 с.

**Голубцова Е.С.**, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов»; E-mail: egolubtsova@tut.by;

**Менделеева О.Л.** – к.т.н., доцент; доцент кафедры «Материаловедение» E-mail: olga\_mendeleewa@list.ru

Белорусский национальный технический университет (БНТУ, г. Минск, РБ);

**Каледина Н.Б.** – старший преподаватель, Белорусский государственный технологический университет (БГТУ, г. Минск, РБ)