

УДК 621-791

EDN [RSNTLS](#)



<https://www.doi.org/10.47813/mip.5.2023.9.50-57>

Совершенствование технологии ультразвуковой сварки алюминиевой проволоки при изготовлении изделий силовой электроники

**Н.Н. Антонычев, М.В. Архипов*, И.К. Козлов, А.А. Подувальцев,
Р.И. Ямгулин**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,
Нижний Новгород, Россия

*E-mail: M.V.Arhipov@mail.ru

Аннотация. В работе исследован процесс формирования сварных межсоединений кристалл-корпус электронных приборов алюминиевой проволокой диаметром 300 мкм методом «клин-клин». Комплекс исследований включает в себя измерение осадки сварочной проволоки во время сварки, оптимизация параметров режима сварки методом планирования эксперимента. Посредством сварки с дискретным увеличением времени импульса проанализирован характер деформации проволоки. Проведенные исследования были учтены при разработке установок ультразвуковой сварки методом «клин-клин».

Ключевые слова: микроэлектроника, микросварка, клин-клин, алюминий, микросхема.

Improvement of ultrasonic welding technology aluminum wire in the manufacture of power products electronics

**N.N. Antonchev, M.V. Arhipov*, I.K. Kozlov, A.A. Poduvalcev,
R.I. Yamgulin**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod,
Russia,

*E-mail: M.V.Arhipov@mail.ru

Abstract. The paper investigates the process of forming welded crystal-body interconnections of electronic devices with aluminum wire with a diameter of 300 microns by the "wedge-wedge" method. The complex of studies includes measurement of welding wire precipitation during welding, optimization of welding mode parameters by the method of experiment planning. By means of welding with a discrete increase in the pulse time, the nature of the deformation of the wire is analyzed. The conducted studies were taken into account when developing ultrasonic welding installations using the "wedge-wedge" method.

Keywords: microelectronics, micro-welding, wedge-wedge, aluminum, microcircuit.

1. Введение

В настоящее время развитие и модернизация экономики в значительной мере определяется уровнем научно-технического развития микроэлектроники. При изготовлении изделий микроэлектроники широко применяется проволочное соединение контактных площадок кристалла и корпуса микроэлектронных приборов ультразвуковой микросваркой (в дальнейшем УЗС). УЗС имеет ряд преимуществ, среди которых: возможность применения универсального оборудования, широкая практика и опыт применения в промышленности, практически отсутствует нагрев кристалл в процессе сварки [1], однако процент брака достаточно высок.

При изготовлении приборов силовой электроники используется УЗС методом клин-клин по схеме представленной на рисунке 1 [2].

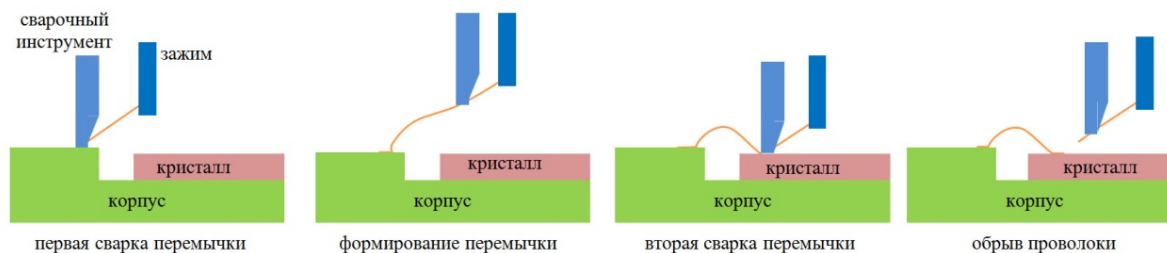


Рисунок 1. УЗС проволочной перемычкой методом клин-клин.

Одной из главных задач совершенствования технологии УЗС состоит в увеличении процента выхода годных изделий.

2. Постановка задачи

Стабильность и повторяемость сборки обуславливается множеством факторов: стабильностью выходных параметров ультразвукового генератора, выбором оптимальных режимов сварки, конструкцией и состоянием сварочного инструмента, наличием окислов и загрязнений на свариваемых поверхностях и тд. Степень, характер и условия процесса деформации определяют условия взаимодействия проволочного проводника со свариваемой поверхностью и соответственно определяют прочность соединения. Акустическая энергия ультразвуковых колебаний и усилие нагружения обеспечивают интенсивную пластическую деформацию в зоне контакта проволоки и

подложки, что способствует активации поверхностных атомов и формирования межатомных связей. Соединение формируется в твердой фазе.

Основными параметрами режима являются: амплитуда колебаний ультразвука, усилие нагружения, длительностью импульса УЗС, дополнительными: частота и форма огибающей ультразвуковых колебаний [2].

В условиях производства достаточно часто подбор режима осуществляют визуально-измерительным осмотром сварного соединения с выборочным контролем прочности перемычки, что не гарантирует оптимальных значений параметров режима, обеспечивающих высокое качество и стабильность процесса сварки.

Целью работы является исследование процесса деформации сварочной проволоки и оценка влияния параметров режима на прочность сварного соединения.

3. Методы и материалы исследования

Исследования проводились на установке ультразвуковой микросварки УМС-20У. Для разварки была использована проволока диаметром 300 мкм марки АОЦПоМ на пластину из поликора с алюминиевым напылением, сварочный инструмент с V-образной канавкой. Установка оснащена пьезокерамическим преобразователем с резонансной частотой 62 кГц. Встроенный ультразвуковой генератор позволяет работать в режиме фазовой автоподстройки резонансной частоты во время сварки.

Экспериментально был подобран режим сварки со следующими значениями параметров режима:

- Выходное напряжение ультразвукового генератора (определяющее значение амплитуды колебаний инструмента) 25.0 В;
- Длительность импульса УЗС 400 мс;
- Усилие нагружения 700 гс.

Динамику осадки оценивали путем серии сварок с шаговым увеличением длительности импульса УЗС в 30 мс, в диапазоне от 10 до 300 мс, при неизменном значении других параметров.

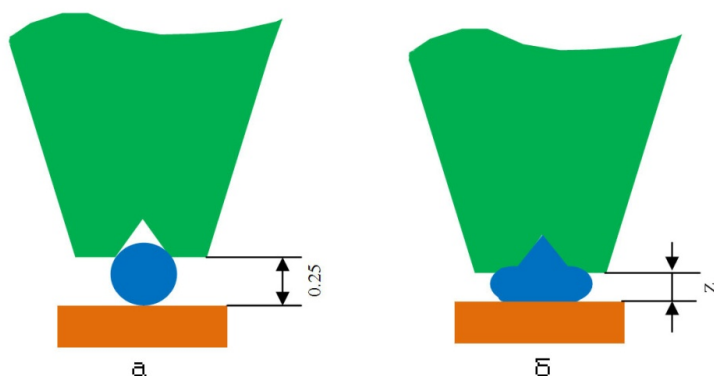


Рисунок 2. Поперечное сечение проволоки в месте соединения: а – до УЗ импульса; б – после УЗ импульса.

Величину деформации определяли по способу, предложенному в работе [3], где деформацию проволоки оценивали по вертикальному перемещению сварочного инструмента во время сварки Δz . Величину перемещения можно определить по размерам отпечатка проволоки перпендикулярно её оси после сварки z . Расстояние от торца сварочного инструмента до свариваемой поверхности до сварки известно и для сварочного инструмента использованного в данной работе составляет 250 мкм. Измерив расстояние между торцом сварочного инструмента по отпечатку от проволоки после сварки, можно определить Δz :

$$\Delta z = 250 - z \quad (1)$$

Измерение z производили при помощи микроскопа ЛабоМет-2 ЛПО с предварительной калибровкой по эталону. Прочность сварного соединения оценивали испытанием на сдвиг. Испытание проводили на установке УМС-ТМИ-02/5000 с максимальным усилием нагружения 5000 гс [4].

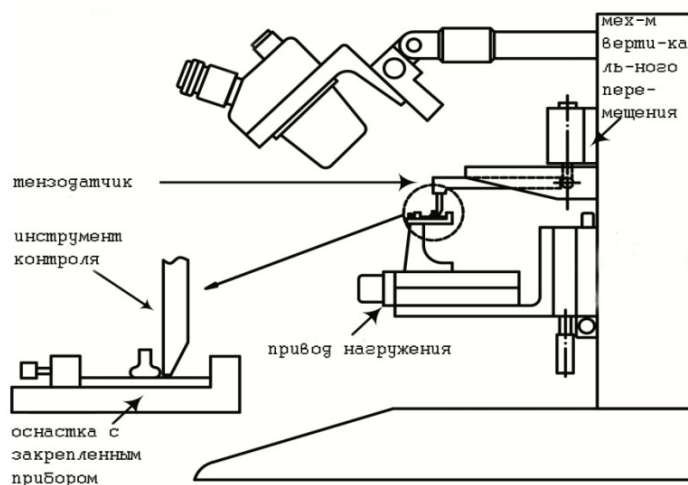


Рисунок 3. Схема испытания сварного соединения на сдвиг.

4. Полученные результаты

На рисунке 4 показан вид сварного соединения вдоль и поперек зоны сварки при длительности импульса УЗС.

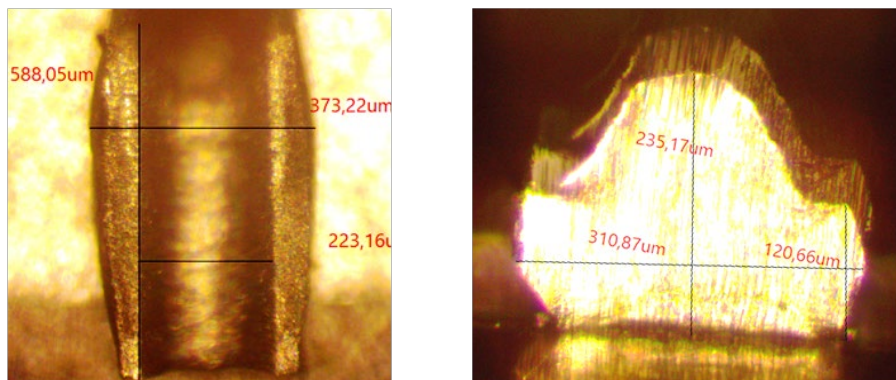


Рисунок 4. Форма и размеры сварного соединения в двух проекциях при времени сварки 120 мс.

На рисунке 5 показан характер изменения величины осадки проволоки и характер изменения прочности перемычки на сдвиг.

Наиболее интенсивно процесс пластического деформирования с локализацией в зоне сварки имеет место в первой трети длительности процесса. Далее имеет место объемная деформация проволоки вне зоны сварного соединения с уменьшением и стабилизацией величины осадки.

Анализ характера изменения прочности сварного соединения показывает, что определяющим является не только интенсивная пластическая деформация в зоне сварки, но и стадия объемного взаимодействия. На начальном этапе сварки интенсивная пластическая деформация инициирует очаги «схватывания», несмотря на дальнейшее снижение интенсивности деформации в зоне сварки рост очагов «схватывания» продолжается.

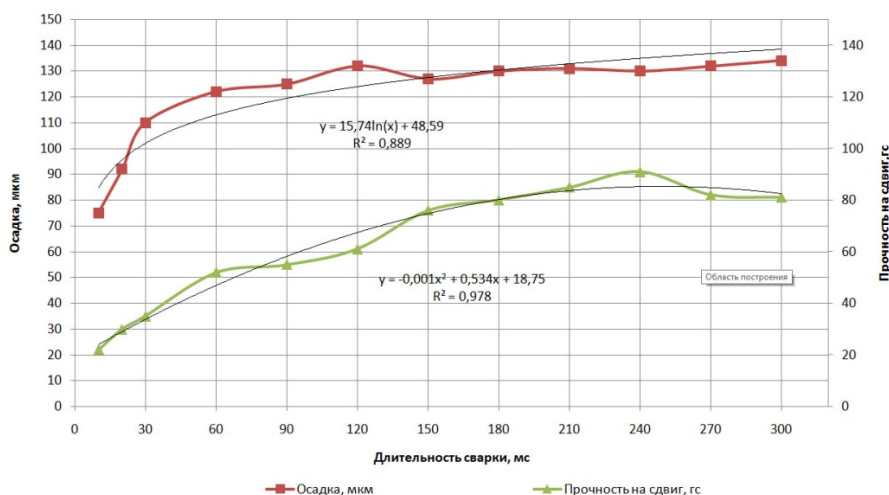


Рисунок 5. Характер осадки и прочности соединения на сдвиг в зависимости от длительности сварки.

Оценка влияния параметров процесса УЗС на прочность сварных соединений, выбор направления поиска оптимальных значений параметров режима сварки осуществлялись с применением метода планирования эксперимента [6]. В качестве факторов были выбраны: выходное напряжение ультразвукового генератора (U, В); кодовое обозначение X1, длительность импульса ультразвука (Т,мс); X2, усилие нагружения (Р, гс); X3.

Параметр оптимизации - прочность сварного соединения на сдвиг F (гс). Число параллельных опытов -4, (Y1, Y2, Y3, Y4).

Таблица 1. Факторы и интервалы их варьирования.

Уровень независимых переменных	Кодовое значение	Натуральные значения		
		U, В (X1)	T, мс (X2)	P, гс (X3)
Нулевой уровень	0	26	350	650
Верхний уровень	+1	29	550	900
Нижний уровень	-1	23	150	400
Интервал варьирования		30	200	250

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента.

X0	X1	X2	X3	X1*X2	X1*X3	X2*X3	X1*X2*X3	Y1	Y2	Y3	Y4	Y _{ср}
1	1	1	1	1	1	1	1	89	92	95	89	91,25
1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	63	59	57	61	60
1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	87	81	81	79	82
1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	59	53	61	54	56,75
1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	92	88	94	89	90,75
1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	94	97	94	92	94,25
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	100	96	92	96	96
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	91	90	94	93	92

Таблица 3. Коэффициенты регрессии.

Коэффициент регрессии	Значение
b0	82,875
b1	7,125
b2	1,1875
b3	-10,375
b4	-0,1875
b5	7
b6	1,9375
b7	1,6875

Для оценки достоверности наблюдений произведена проверка однородности дисперсий по критерию Кохрена [5]:

$$0.222 < G = 0.438 \quad (2)$$

По результатам эксперимента получено уравнение регрессии в кодовых переменных:

$$Y = 82.9 + 7.1X_1 + 1.2X_2 - 10.4X_3 + 7.0X_1X_3 + 1.9X_2X_3 + 1.7X_1X_2X_3 \quad (3)$$

Проверка адекватности модели по критерию Фишера, подтверждает адекватность модели.

$$F_p = 0.15 < F_t = 2.5 \quad (4)$$

Анализ полученного уравнения (3) показывает, что наиболее значимыми параметрами режима УЗС являются амплитуда ультразвуковых колебаний (выходное напряжение ультразвукового генератора) X_1 и усилие нагружения X_3 . Более высокое значение X_3 со знаком минус указывают, что высокое значение усилия нагружения создает зону притормаживания, снижая амплитуду ультразвуковых колебаний в зоне сварки, затрудняя условия формирования сварного соединения. Значимость времени импульса микросварки существенно ниже. С увеличением усилия нагружения время импульса рекомендуется увеличивать. Увеличение усилия нагружения требует повышения параметра амплитуды ультразвуковых колебаний и наоборот.

5. Выводы

Наиболее интенсивно процесс пластического деформирования, с локализацией в зоне сварки, имеет место в первой трети длительности процесса. Далее имеет место объемная деформация проволоки вне зоны сварного соединения, с уменьшением и стабилизацией величины осадки.

Анализ характера изменения прочности сварного соединения показывает, что определяющим является не только интенсивная пластическая деформация в зоне сварки, но и стадия объемного взаимодействия играет существенную роль.

Полученное методом планирования эксперимента уравнение регрессии, показывает, что наиболее значимыми параметрами режима УЗС являются амплитуда ультразвуковых колебаний (выходное напряжение ультразвукового генератора) и усилие нагружения.

Значимость времени импульса существенно ниже, с увеличением усилия нагружения время импульса рекомендуется увеличивать. Знак минус усилия нагружения указывает, что высокое значение создает зону притормаживания, снижая амплитуду ультразвуковых колебаний в зоне сварки и затрудняя условия формирования сварного соединения.

Список литературы

1. Хохлун А. Перспективные технологии для сборки силовых модулей и приборов / А. Хохлун, С. Чигиринский, Р. Шайдуллин // Электроника. – 2021. – №3. – С. 156-161.
2. Гуськов Г.Я. Монтаж микросхемной аппаратуры / Г.Я. Гуськов, Г.А. Блинов, А.А. Газаров. – М.: Радио и связь, 1986.
3. Masakatsu Maeda. Deformation Behavior of Thick Aluminum Wire during Ultrasonic Bonding / Masakatsu Maeda [et al.] // Materials Transactions. – 2013. – Vol. 54(6). – P. 916-921.
4. micro-bond.com: сайт. – 2021. – URL: <https://micro-bond.com/ums-tmi-02/> (дата обращения: 01.08.2023)
5. Юдин Ю.В. Организация и математическое планирование эксперимента / Ю.В. Юдин, М.В. Масурадзе, Ф.В. Водолазский. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 124 с.