

УДК 621.3.049.77–048.24:537.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИИ В МИКРОСВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МИКРОСВАРКЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОРПУСАХ

Нгуен Ж.В

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь**Научный руководитель: Ланин В.Л. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры ЭТТ*

**Аннотация.** Процессом диффузии является важный в процессе ультразвуковой микросварки проволочных выводов интегральных схем. Коэффициент диффузии влияет непосредственно на прочность микросварных соединений при различных корпусах. Результаты моделирования показывают, что глубина диффузии для корпуса с никельевым покрытием равна  $\approx 0,6$  мкм, а с серебряным покрытием  $\approx 0,4$  мкм. По эксперименту прочность микросварных соединений для корпуса с никельевым покрытием равна 37 сН, а для корпуса с серебряным покрытием равна 30,5 сН.

**Ключевые слова:** Диффузия, глубина диффузии, УЗ поле.

**Введение.** Технология УЗ сварки представляет собой соединение деталей под воздействием УЗ волн, которые преобразуются в механические колебания и вызывают пластическую деформацию плоскостей в месте их соприкосновения, одновременно разрушая оксидные пленки. Свойства металлов почти не изменяются.

Исследование процесса диффузии представляет теоретический интерес для понимания микрокартины различных явлений, связанных с переносом вещества, и имеет практическое значение для многих химических и металлургических процессов.

**Основная часть.** В области контакта двух разнородных металлов при УЗС происходит процесс взаимной диффузии, результатом которого является формирование диффузионной зоны, которая характеризуется градиентами концентрации и химического потенциала в связи с неоднородным распределением компонентов, вследствие чего происходит диффузионное перемещение атомов, ведущее к установлению во всем объеме соединения фазового состава, определяемого диаграммой состояния.

Исследование процесса диффузии в микросварном соединении (Al– проволока, Ag – материал корпуса) играет важную роль в процессе повышения прочности микросварного соединения при УЗ микросварке. Для повышения прочности микросварного соединения увеличивают концентрацию диффундирующего в серебро алюминия под действием УЗ поля. Воздействие энергии УЗ полем также увеличивает коэффициент диффузии и активизирует процесс зародышеобразования [1].

$$D = D_0 e^{\frac{E_a - \Delta E}{kT}} \quad (1)$$

где  $D_0$  – предэкспоненциальный множитель;  
 $E_a$  – энергия активации диффузии;  
 $\Delta E$  – изменение энергии активации диффузии в УЗ поле;  
 $k$  – постоянная Больцмана;  
 $T$  – абсолютная температура.

Изменение энергии активации диффузии в УЗ поле:

$$\Delta E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \quad (2)$$

где  $\omega$  – частота колебания, Гц

$A$  – амплитуда колебания, мкм

$m$  – масса, кг:  $m = \rho V$ , где  $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$ ,  $V$  – объём =  $S \cdot l$  тогда  $m = 1,364 \cdot 10^{-19} \text{ кг}$ .

При  $\omega = 96000 \text{ Гц}$ ,  $A = 2 \text{ мкм} \Rightarrow \Delta E = 1,68 \text{ эВ}$ .

Рассчитать энергию активации диффузии можно по следующим формулам (1).  
Эффективная энергия атома, приходящаяся на один валентный элемент [2]:

$$Q_0 = \frac{P_0}{2r_i n}, \quad (3)$$

где  $\frac{P_0}{2r_i}$  – усредненная эффективная энергия атома по валентным электронам;

$n$  – число эффективных валентных электронов.

Энергия активации процесса диффузии:

$$\frac{1}{E_a} = 2 \left[ \left( \frac{r_i n}{P_0} \right)_A + \left( \frac{r_i n}{P_0} \right)_B \right], \quad (4)$$

где  $E_a$  – энергия активации процесса диффузии атомов элемента В в среде атомов элемента А.

Для вычисления энергии активации процесса диффузии, используем данные энергии активации объемной самодиффузии атомов (таблица 1).

Таблица 1 – Энергии активации объемной самодиффузии атомов

Атом	$P_0$ , эВ	$r_i$	$n$
<i>Mg</i>	15,436	1,279	2
<i>Al</i>	31,624	1,312	3
<i>Si</i>	54,394	1,068	4
<i>Zn</i>	12,798	1,065	2
<i>Cd</i>	8,349	1,184	2
<i>Ni</i>	46,954	1,139	4
<i>Ag</i>	18,044	1,285	2

Для вычисления энергии активации процесса диффузии на границе *Al – Ag* использованы данные объемной самодиффузии атомов (табл. 1). Из таблицы 1 и уравнения (4) получим  $E_a =$

$2,2182 \text{ эВ}$ . При  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow D = D_0 e^{-\frac{E_a - \Delta E}{kT}} \approx 1,65 \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ .

Глубина диффузии может быть ориентировочно определена:

$$d = \sqrt{D \times t}, \quad (5)$$

где  $t$  – время диффузии.

При длительности сварочного импульса 100 мс глубина диффузии может достигнуть  $d \approx 0,406 \text{ мкм}$ .

Для вычисления энергии активации процесса диффузии на границе *Al – Ni* использованы данные объемной самодиффузии атомов, из таблицы 1 и уравнения (4) получим  $E_a = 2,2574$

эВ. При  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow D = D_0 e^{-\frac{E_a - \Delta E}{kT}} \approx 3,38 \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ .

При длительности сварочного импульса 100 мс глубина диффузии может достигнуть  $d \approx 0,582 \text{ мкм}$ .

Моделирование процесса диффузии в микросварном соединении при УЗ микросварке без тока и с током в пакете *COMSOL Multiphysics* позволило получить зависимости плотности атомов диффузии от времени и зависимости концентрации атомов диффузии от глубины.

Моделирование проведено для  $C_0 = 10^9$  мол/м<sup>3</sup>, параметры для моделирования в программе *Comsol Multiphysics* приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры для моделирования процесса диффузии алюминия в никель

Параметры	Единица измерения	Никель	Серебро
Плотность	кгг/м <sup>3</sup>	8902	10490
Электрическая проводимость	Сим/м	$1,11 \cdot 10^7$	$6,25 \cdot 10^7$
Теплопроводность	Вт/(м·К)	107	429
Теплоемкость при постоянном давлении	Дж/(кг·К)	443	235
Модуль Юнга	ГПа	210	80
Коэффициент Пуассона		0,28	0,37

Распределения атомов алюминия в серебряном и никельевом покрытии контактных площадок в процессе диффузии в микросварном соединении при УЗ микросварке показаны на рисунке 1, а зависимости концентрации атомов диффузии от глубины показаны на рисунке 2.

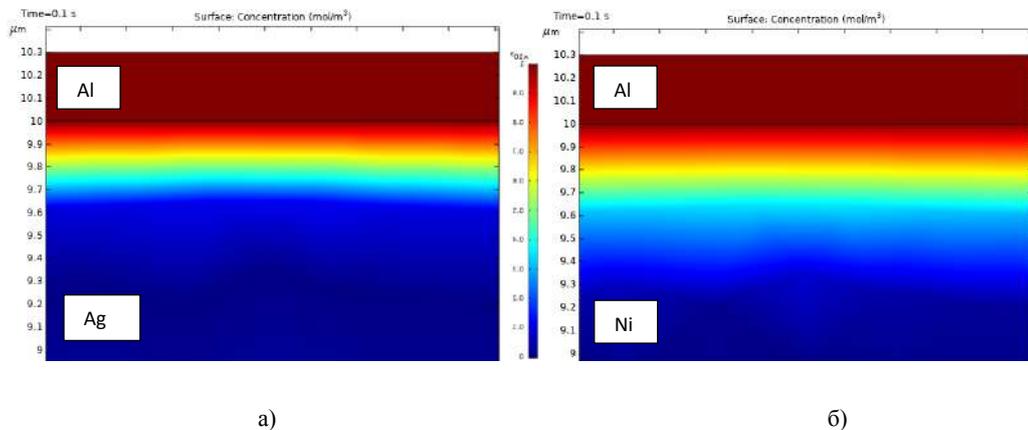


Рисунок 1 – Распределения атомов алюминия в серебряном покрытии а) и в алюминиевом покрытии б) в процессе диффузии в микросварном соединении при УЗ микросварке

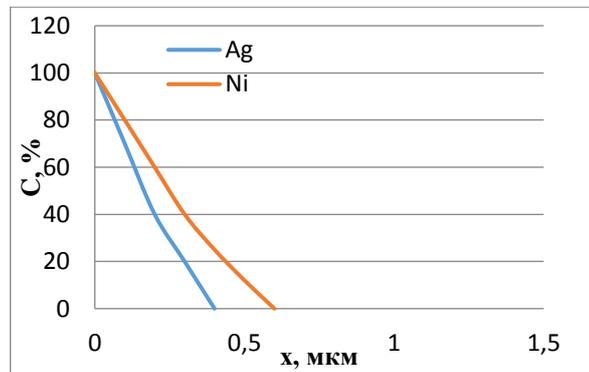


Рисунок 2 – Зависимости концентрации атомов диффузии от глубины

Из рисунков 1 и 2 видно, что глубина диффузии для корпуса с никельевым покрытием  $\approx 0,6$  мкм, а для корпуса с серебрянным покрытием  $\approx 0,4$  мкм. Зависимости плотности атомов диффузии от времени микросварки в точке, находящейся от границы  $0,1$  мкм показаны на рисунке 3.

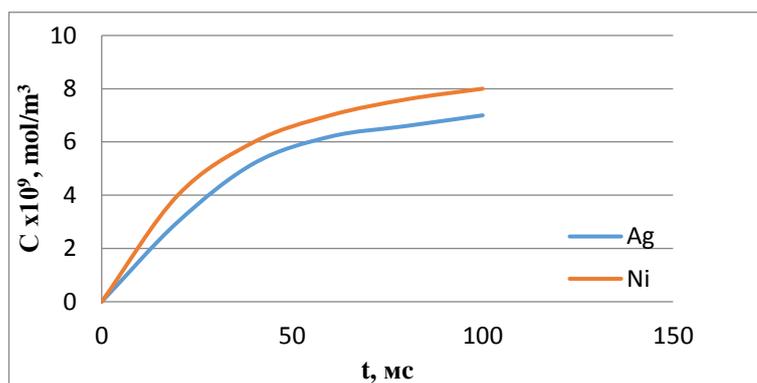


Рисунок 3 – Зависимости плотности диффузии атомов алюминия от времени микросварки и плотности импульса электрического тока

Установка присоединения выводов ЭМ-4320 (рисунок 4) – для присоединения выводов из алюминиевой проволоки увеличенного сечения диаметром от 1 до 255 мкм методом УЗ сварки способом "клин-клин". Технологические характеристики установки присоединения выводов ЭМ-4320 показаны на таблице 3.



Рисунок 4 – Установка присоединения выводов ЭМ-4320

Установка обладает расширенными возможностями по разварке выводов, обеспечивая присоединение к контактным площадкам изделий электронной техники способами «клин-клин» и «шарик-клин», используя термозвуковую, ультразвуковую и контактную сварку [3].

Таблица 3 – Технологические характеристики установки присоединения выводов ЭМ-4320

Рабочее поле перемещения стола, мм: - грубое (вручную) - точное (манипулятором)	150 15
Температура рабочей зоны стола, °С	До 300
Усилие сжатия соединяемых элементов, Н: - статическое (пружиной) - электромагнитное (от статического)	0,1...2,5 0,03...1,0
Воспроизводимость усилия сжатия	До 10%
Рабочая частота УЗП, кГц	96 ±5%
Масса, кг	До 110

Для экспериментов принимаются проволока алюминия с диаметром 80 мкм, корпуса с покрытием никеля и серебра 3 мкм. Результаты измерений показаны на рисунке 5.

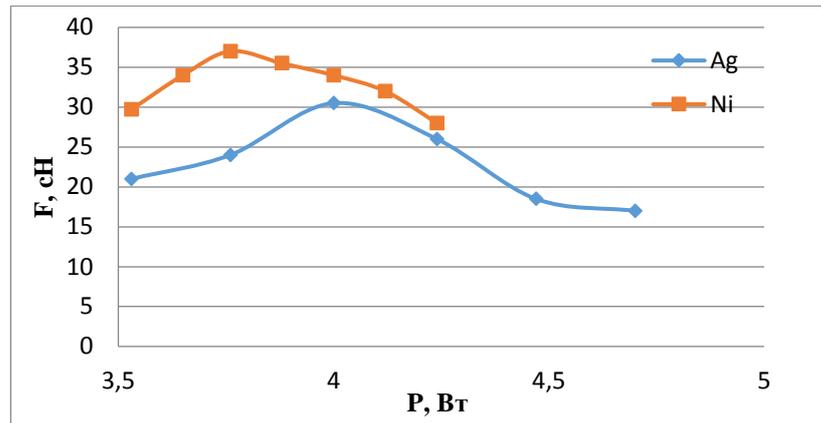


Рисунок 5 – Зависимости усилия отрыва от мощности при различных корпусах

Из рисунка 5 видно, что при различных корпусах прочность микросварных соединений изменяется. Прочность микросварных соединений для корпуса с никельевым покрытием равна 37 сН, а с серебрянным покрытием равна 30,5 сН, следует, что для корпуса с никельевым покрытием прочность микросварных соединений больше на 20 %, чем с серебрянным покрытием.

**Заключение.** Выполнен анализ процесс диффузии проволока в контактную площадку в процессе ультразвуковой микросварки проволочных выводов для различных покрытий корпусов интегральных схем. Важной проблемой в процессе присоединения выводов интегральных схем является повышение качества микросварных соединений при воздействии УЗ колебаний. Для экспериментов применена прочность микросварных соединений для для корпуса с никельевым покрытием больше на 20 %, чем с серебрянным покрытием

### Список литературы

1. Макаров С. Формирование диффузионной зоны на границе раздела биметалла никель-алюминий / Макаров С. В [и др] // Барнаул, Алтайский государственный университет, 2018 – С. 29 – 33.
2. Соловьев, С.Д. Расчет энергии активации объемной диффузии и самодиффузии элементов в твердых телах / С.Д. Соловьев, Г.А. Корблев, В.И. Кодолов // Химическая физика и мезоскопия. 2005. – Том 7. – №1. – С. 31–40.
3. Установка присоединения выводов ЭМ-4320. [Электронные ресурсы] – режим доступа: [www.kbtem.by/products/wire-bonding/em-4320u](http://www.kbtem.by/products/wire-bonding/em-4320u).

UDC 621.3.049.77–048.24:537.2

## SIMULATION OF THE PROCESS OF DIFFUSION IN MICROSWELEDDED JOINT DURING ULTRASONIC MICROSWELEDDED WITH DIFFERENT BODIES

Nguyen G.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Lanin V.L. – Dr. Tech. Sc., full professor, professor of the department of ETT

**Annotation** The diffusion process is important in the process of ultrasonic microwelding of wire leads of integrated circuits. The diffusion coefficient directly affects the strength of micro-welded joints in various housings. The simulation results show that the diffusion depth for a nickel-plated case is  $\approx 0.6 \mu\text{m}$ , and for a silver-plated case it is  $\approx 0.4 \mu\text{m}$ . The strength of micro-welded joints for a nickel-plated body is 37 cN, and for a silver-plated body it is 30.5 cN.

**Keywords:** Diffusion, diffusion depth, ultrasonic field.