

УДК [611.018.51+615.47]:612.086.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИИ В МИКРОСВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МИКРОСВАРКЕ И ТОКОВОЙ АКТИВАЦИИ



В.Л. Ланин

Профессор кафедры электронной техники и технологии, доктор технических наук



Ж.В. Нгуен

Магистрант кафедры электронной техники и технологии

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь.

Email: vlanin@bsuir.by, giavien1996@gmail.com.

В. Л. Ланин

Профессор кафедры электронной техники и технологии. Имеет 40 летний опыт работы в области технологии производства электронной аппаратуры. Автор более 10 монографий в данной области.

Ж. В. Нгуен

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в 2020. Магистрант кафедры электронной системы и технологии. Проводит научные исследования по технологии ультразвуковой микросварки проволочных выводов интегральных схем с активацией импульсами электрического тока.

Аннотация. Активация процесса диффузии при ультразвуковой микросварке пропусканием импульса электрического тока играет важную роль в процессе повышения прочности микросварных соединений. Концентрация диффундирующего элемента и глубина диффузии увеличиваются под действием ультразвука и электрического тока, что повышает прочность микросварного соединения. Результаты моделирования показывают, что при активации импульсами электрического тока концентрация диффундирующего элемента Al на граничной глубине растет в среднем на 10–15 %, а максимальная глубина процесса диффузии увеличивается на 40 %.

Ключевые слова: диффузия, УЗ поле, электрический ток, микросварка.

Процесс ультразвуковой (УЗ) микросварки сопровождается введением механических колебаний УЗ частоты в зону контакта, что приводит к пластической деформации проволочного вывода, разрушению и удалению оксидных пленок с созданием атомно-чистых ювенильных поверхностей, интенсифицирует процесс образования активных центров и межфазную диффузию при формировании микросварного соединения без значительного нагрева. В области контакта двух разнородных металлов происходит процесс взаимной диффузии, результатом которого является формирование переходной области, так называемой диффузионной зоны. Диффузионная зона характеризуется градиентом концентрации и градиентом химического потенциала в связи с неоднородным распределением компонентов системы, вследствие чего происходит диффузионное перемещение атомов, ведущее в итоге к установлению во всем объеме соединения фазового состава, определяемого диаграммой состояния [1].

Исследование процесса диффузии в микросварном соединении Al–Ni (Al – проволока,

Ni – материал корпуса) играет важную роль в процессе повышения прочности микросварного соединения при УЗ микросварке. Для повышения прочности микросварного соединения увеличивают концентрацию диффундирующего в никель алюминия под действием УЗ поля. Воздействие энергии УЗ полем также увеличивает коэффициент диффузии и активирует процесс зародышеобразования [2]:

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

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

Рассчитать энергию активации диффузии можно по следующим формулам [3]. Эффективная энергия атома, приходящаяся на один валентный элемент:

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

где $\frac{P_0}{2r_i}$ – усредненная эффективная энергия атома по валентным электронам; n – число эффективных валентных электронов.

Энергия активации процесса диффузии:

$$\frac{1}{E_a} = 2 \left[\left(\frac{r_i n}{P_0} \right)_A + \left(\frac{r_i n}{P_0} \right)_B \right], \quad (3)$$

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

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

Таблица 1. Энергии активации объемной самодиффузии атомов

| Атом | P_0 , эВ | r_i | n |
|------|------------|-------|-----|
| Mg | 15,436 | 1,279 | 2 |
| Al | 31,624 | 1,312 | 3 |
| Si | 54,394 | 1,068 | 4 |
| Zn | 12,798 | 1,065 | 2 |
| Cd | 8,349 | 1,184 | 2 |
| Ni | 46,954 | 1,139 | 4 |

Из таблицы 1, получим: $\frac{1}{E_a} = 2 \left[\left(\frac{1,312 \times 3}{31,624} \right)_A + \left(\frac{1,139 \times 4}{46,954} \right)_B \right] \Rightarrow E_a = 2,2574$ эВ.

Изменение энергии активации диффузии в УЗ поле:

$$\Delta E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2, \quad (4)$$

где ω – частота колебания, Гц. A – амплитуда колебания, мкм. m – масса, кг: $m = \rho V$, где $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$, V – объём = $S \cdot l$ тогда $m = 4,05 \cdot 10^{-19}$ кг.

При $\omega = 96000$ Гц, $A = 2$ мкм $\Rightarrow \Delta E = 1,85$ эВ.

$$\text{При } T = 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow D = D_0 e^{-\frac{E_a - \Delta E}{kT}} \approx 3,38 \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}.$$

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 $d \approx 0,582$ мкм.

Плотность импульса тока активации для проволоки диаметром 80 мкм составляет:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{I}{\pi \times \frac{D^2}{4}}. \quad (6)$$

При $I = 0,3 \text{ А} \Rightarrow J = 59,68 \text{ А/мм}^2$, при $I = 0,6 \text{ А} \Rightarrow J = 119,37 \text{ А/мм}^2$.

Процессы электродиффузии в контактных соединениях заметны при плотности тока с 10 А/мм^2 . 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 $C_0 = 10^9 \text{ мол/м}^3$, параметры для моделирования в программе Comsol Multiphysics показаны в таблице 2.

Таблица 2. Параметры для моделирования процесса диффузии алюминия в никель

| Параметры | Единица измерения | Алюминия | Никель |
|---------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Плотность | кг/м ³ | 2700 | 8902 |
| Электрическая проводимость | Сим/м | $3,77 \cdot 10^7$ | $1,11 \cdot 10^7$ |
| Теплопроводность | Вт/(м·К) | 238 | 107 |
| Теплоемкость при постоянном давлении | Дж/(кг·К) | 900 | 443 |
| Модуль Юнга | ГПа | 70 | 210 |
| Коэффициент Пуассона | | 0,33 | 0,28 |
| Коэффициент температурного расширения | 1/К | $23 \cdot 10^{-6}$ | $13 \cdot 10^{-6}$ |

Распределения атомов алюминия в никелевом покрытии контактных площадок в процессе диффузии в микросварном соединении при УЗ микросварке без тока и с током $I = 0,6 \text{ А}$ показаны на рисунке 1.

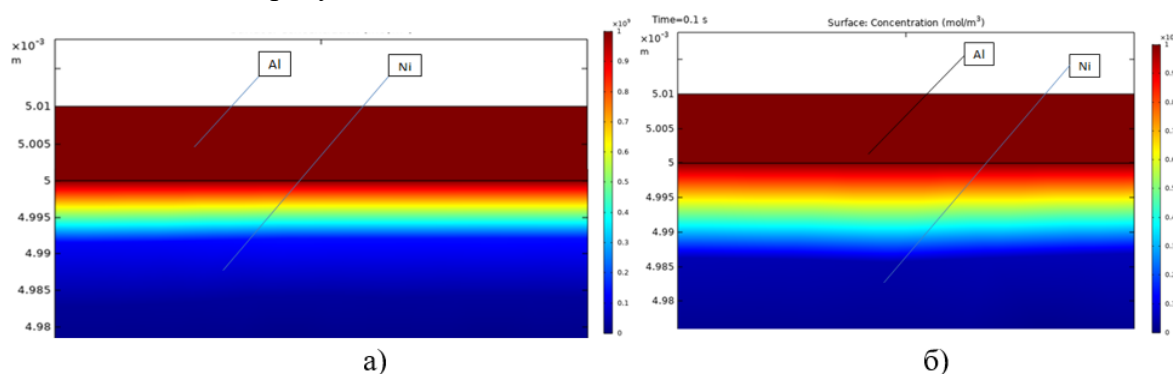


Рисунок 1. Распределения атомов алюминия в никелевом покрытии в процессе диффузии в микросварном соединении при УЗ микросварке: а) без тока; б) с током $I = 0,6 \text{ А}$

Из рисунка 1, видно, что глубина диффузии в ситуации без тока $\approx 0,6$ мкм, а с током $I = 0,6$ А $\approx 1,1$ мкм, следует, что при активации импульса электрического тока глубина диффузии и концентрация диффузирующего в никель алюминия увеличиваются почти в 2 раза, то есть происходит усиление процесса диффузии с помощью электрического тока.

Зависимости плотности атомов диффузии от времени микросварки в точке, находящейся от границы 1 мкм показаны на рисунке 2, а зависимости концентрации атомов диффузии от глубины показаны на рисунке 3.

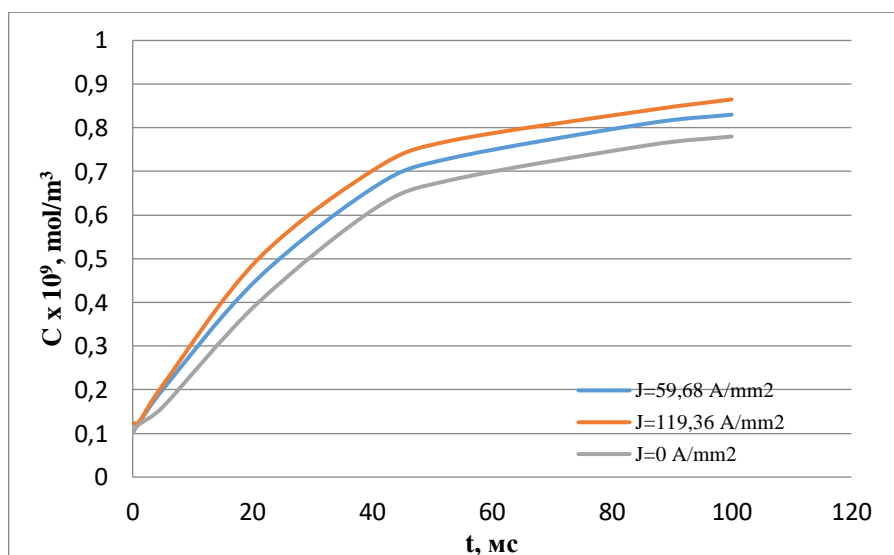


Рисунок 2. Зависимости плотности диффузии атомов алюминия от времени микросварки и плотности импульса электрического тока

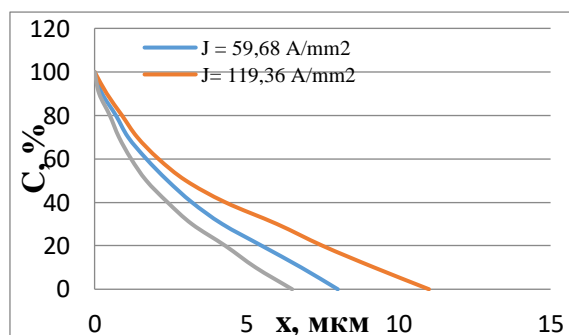


Рисунок 3. Зависимости концентрации атомов диффузии от глубины

Результаты моделирования показывают, что при активации импульсами электрического тока концентрация диффундирующего элемента Al на граничной глубине в среднем на $\approx 10\text{--}15\%$, а максимальная глубина процесса диффузии увеличивается на $\approx 40\%$.

Таким образом, при активации импульса электрического тока концентрация диффундирующего элемента и глубина диффузии увеличиваются, следует, что повышение прочности микросварного соединения.

Список литературы

- [1] Формирование диффузионной зоны на границе раздела биметалла никель/алюминий / С.В. Макаров, [и др.] // Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия. – 2018. – С. 29–33.
- [2] Ланин, В.Л. Активация процессов формирования паяных соединений энергией ультразвуковых и электрических полей / В.Л. Ланин // Электронная обработка материалов, 2008. – № 3. – С. 82–88.

[3] Соловьев, С. Д. Расчет энергии активации объемной диффузии и самодиффузии элементов в твердых телах / С. Д. Соловьев, Г. А. Кораблев, В. И. Кодолов // Химическая физика и мезоскопия. 2005. – Том 7. – №1. – С. 31–40.

SIMULATION OF THE PROCESS OF DIFFUSION IN A MICROWELDED JOINT AT ULTRASONIC MICROWELDING WITHOUT CURRENT AND WITH A CURRENT

V.L. LANIN

Doctor of Technical Sciences

Professor, Department of Electronic System and Technology, BSUIR

G.V. NGUYEN

Master's student

Department of Electronic System and Technology, BSUIR

Belarus State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

E-mail: vlanin@bsuir.by, giavien1996@gmail.com

Abstract. Activation the diffusion process by using an electric current pulse plays an important role in the process of increasing the strength of the microwelded joint. The concentration of the diffusing element and the depth of diffusion increase under the action of the ultrasonic field and the electric field, it follows that the strength of the microwelded joint increases. The simulation results show that upon activation by electric current pulses, the concentration of the diffusing element Al at the boundary depth increases by an average of 10–15%, and the maximum depth of the diffusion process increases by 40%.

Key words: diffusion, ultrasonic field, concentration, diffusion depth.