

АКТИВАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭНЕРГИЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П.Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь, Vlanin@bsuir.unibel.by*

Кинетика процессов, протекающих при формировании паяных соединений – поглощение энергии, диффузия, физическое и химическое взаимодействие компонентов и т.д., усложняется при совместном воздействии энергии ультразвуковых (УЗ) и электрических полей. Активация энергией УЗ поля – один из эффективных процессов, поскольку механические упругие колебания частотой 18–70 кГц и интенсивностью 0,1–1,0 МВт/м² интенсифицируют большинство физико-химических процессов: смачивание, растекание, капиллярное течение припоя, диффузию припоя в паяемые материалы [1]. Воздействие энергии электрического поля увеличивает тепловую энергию системы, что позволяет ускорить достижение температуры пайки, увеличить растекание припоя и повысить тем самым качество соединений [2].

Однако физическая сущность совместного влияния энергии УЗ и электрического полей на процессы смачивания и диффузии выявлена еще недостаточно. Согласно гипотезе Я. И. Френкеля поверхностная энергия расплавов рассматривается как электростатическая энергия двойного электрического слоя, возникающего на поверхности металла. Поскольку электроны атомов наружного слоя металла обладают энергией, отличной от энергии электронов глубинных атомов, на границе расплав – твердое тело образуется своеобразный конденсатор, определяющий величину поверхностной энергии границы раздела и ее поверхностное натяжение. С этой точки зрения поверхностное натяжение расплавленного металла можно оценить как электрическую энергию конденсатора, отнесенную к единице площади. Для металла с валентностью z электрическое поле между обкладками, находящимися на расстоянии l , составляет $E=4\pi ze/R^2$, где e – заряд электрона. Умножая E на толщину конденсатора, равную R , получим разность потенциалов:

$$U=4\pi ze/R, \quad (1)$$

где R – расстояние между положительными ионами.

Полагая R равным $(1-2) \cdot 10^{-10}$ м, $z = 2$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, получаем, что разность потенциалов составит 360–720 В. При активации жидких сред энергией УЗ поля возникает электрокинетический эффект, заключающийся в том, что в результате действия УЗ волны двойной электрический слой сдвигается и на межфазной границе появляется разность потенциалов. Роль энергии УЗ поля сводится к разрядке конденсатора на поверхности раздела, вследствие чего снижается поверхностное натяжение и улучшается смачивание. Энергия плоского конденсатора составляет:

$$W = \epsilon_0 \epsilon U^2 S / 2d, \quad (2)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл/(В·м)), ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость, U – разность потенциалов, S – площадь смачиваемой поверхности, d – толщина оксидной пленки.

Тогда поверхностное натяжение электростатических сил, как энергия отнесенной к площади для $\epsilon \leq 6-7$, составит примерно $(1,5-3,0) \cdot 10^{-3}$ Н/м, что значительно меньше поверхностного натяжения припоя (0,5 Н/м). Для эффективного смачивания необходима более высокая разность потенциалов, однако вследствие повреждения тонкой оксидной пленки в УЗ поле обеспечить это невозможно.

Другие гипотезы теоретически и экспериментально доказывают, что в УЗ поле тангенциальная составляющая колебательного движения σ_r , пропорциональная мощности ультразвука, соизмерима с величиной поверхностного натяжения σ_0 в невозмущенной среде. Поверхностное натяжение в этом случае может быть представлено в виде $\sigma = \sigma_0 - \sigma_r$. Поэтому физические свойства границы раздела фаз изменяются в сторону уменьшения энергии поверхностного натяжения, снижения краевого угла смачивания и улучшения растекания припоя [2]. Поэтому металлы, имеющие меньшую величину σ_0 , должны лучше смачиваться ультразвуком при этой же величине вводимой мощности.

Растекание припоя по поверхности паяемого материала зависит от соотношения сил адгезии припоя к поверхности материала и сил когезии, определяющих прочность связи между частицами припоя. Чем больше будет разность между работой сил адгезии к паяемому материалу и работой сил когезии частиц припоя, определенной из выражения

$$A_{\text{адг}} - A_{\text{ког}} = \sigma_{1,2} (\cos\Theta - 1), \quad (3)$$

тем лучше растекание припоя по паяемой поверхности. Растекание припоя прекращается при достижении равновесия поверхностных натяжений взаимодействующих сред: $\sigma_{1,3} = \sigma_{1,2} \cos\Theta + \sigma_{2,3}$, где $\sigma_{1,2}$, $\sigma_{1,3}$, $\sigma_{2,3}$ – поверхностные натяжения на границах припой–газ, газ–твердое тело, припой–твердое тело соответственно; Θ – угол смачивания. Таким образом, для растекания припоя необходимо, чтобы $\sigma_{1,3} > \sigma_{1,2} \cos\Theta + \sigma_{2,3}$, что может быть достигнуто путем уменьшения поверхностных натяжений $\sigma_{1,3}$, $\sigma_{2,3}$.

В обычном состоянии для расплавленного припоя, находящегося на поверхности паяемого материала, работа сил когезии значительно превышает работу сил адгезии. Расплавленный припой в результате действия сил поверхностного натяжения и сил тяжести принимает форму «сидячей» капли, смачивание поверхности отсутствует. Если в системе припой–паяемый металл введение флюса позволяет обеспечить смачивание поверхности металла за счет удаления окисных пленок с нее, то для труднопаяемых металлов, таких как алюминиевые и титановые сплавы, применение флюсов неэффективно ввиду прочной оксидной пленки на поверхности.

Введение УЗ колебаний в расплав интенсифицирует процесс смачивания неметаллического материала. Происходящие при этом изменения в значениях коэффициентов поверхностного натяжения в меньшей степени отразятся на значениях $\sigma_{1,3}$ и $\sigma_{1,2}$, потому что твердое тело и газовая среда при данных мощностях вводимого ультразвука менее всего подвержены возмущениям. Наибольшие изменения, очевидно, произойдут на границе расплавленный припой–паяемый материал, что отразится на величине коэффициента $\sigma_{2,3}$.

Анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 1, показывает, что сила смачивания расплавом поверхности алюминиевого сплава на единицу длины периметра смачивания для припоев Sn–Zn и Sn–Pb–Zn–In вырастает примерно в 5 раз при величине кавитационного давления в припое 1,5–2,0 кПа, что более чем в 6 раз превышает значение поверхностного натяжения этих припоев при аналогичных температурах (0,5 Н/м). Энергия взаимодействия припоев со стеклокерамикой при угле смачивания 25°, рассчитанная по уравнению Юнга–Дюпре $W = \sigma_{1,2}(1 + \cos\Theta)$, составляет 0,95 Н/м, что почти на три порядка превышает энергию дисперсионного взаимодействия при смачивании жидкостями с низким поверхностным натяжением.

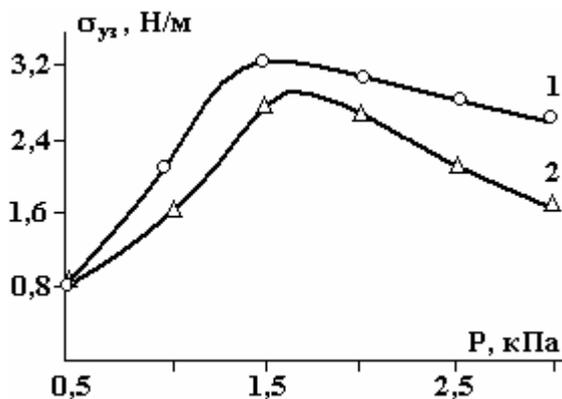


Рис. 1. Зависимости поверхностного натяжения на границе расплав–материал от кавитационного давления в расплаве: 1 – Sn–Pb–Zn–In, 2 – Sn–Zn

Наличие химического взаимодействия при смачивании материалов припоями в УЗ поле подтверждается зависимостью степени смачивания от температуры процесса. При исследовании процесса смачивания сплава АМГ–6 легкоплавкими припоями с температурами плавления ниже 100°C на основе сплава Вуда с добавками металлов Li, Zn, Ga, Ge, In, Pb, Bi, Cd установлено, что температурный порог смачивания находится в пределах 240–280°C. При увеличении мощности ультразвука порог снижается до температуры плавления припоя [1].

Массоперенос в жидкости при УЗ активации происходит как за счет конвективного движения в виде макро- и микропотоков, так и диффузии [3]. Воздействие энергии УЗ полем на расплав увеличивает коэффициент диффузии и активизирует процесс зародышеобразования:

$$D' = D_0 \cdot e^{-\frac{E-\Delta E}{RT}}, \quad (4)$$

где D_0 – предэкспоненциальный множитель, E – энергия активации диффузии, ΔE – изменение энергии активации диффузии в УЗ поле, R – газовая постоянная.

Массоперенос определяется уравнением конвективной диффузии, которое в однородном случае имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D' \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right). \quad (5)$$

Обычно концентрационной зависимостью коэффициента диффузии в жидком растворе можно пренебречь, и тогда уравнение можно записать:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + D' \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (6)$$

где U – составляющая скорости конвективного движения по оси x .

В УЗ поле на диффундирующие частицы действует сила F , и под ее влиянием частицы вещества будут двигаться со средней скоростью:

$$U = \nu \cdot F, \quad (7)$$

где ν – подвижность частиц.

При активации в УЗ поле к потоку диффузии добавится поток частиц, движущихся под действием силы УЗ колебаний F , и тогда полный поток равен:

$$J = -D' \frac{\partial C}{\partial x} + U C_1 \cos \beta, \quad (8)$$

где C_1 – концентрация подвижных частиц, β – угол между векторами силы УЗ поля и диффузионного потока.

Сила УЗ поля, воздействующая на поток частиц, зависит от частоты ω и амплитуды колебаний A :

$$F = \rho c \cdot \omega A \cdot S. \quad (9)$$

Подставляя выражения (7) и (9) в (8), получаем

$$J = -D' \frac{\partial C}{\partial x} + \nu \cdot \rho c \cdot \omega A \cdot S C_1 \cos \beta. \quad (10)$$

Воздействие электрического поля в виде импульсов электрического тока, пропускаемых через расплав с амплитудой, в 3–5 раз превосходящей амплитуду электрического тока начала электропереноса ионов, стимулирует диффузию реакционно-активных компонентов в зоне активации [4]. Одновременное действие макропотоков в припое и мощных импульсов тока способствует возникновению электропереноса и усиливает направленную диффузию компонентов в паяном соединении. Обусловленный электропереносом суммарный поток ионов реакционно-активных компонентов имеет вид [5]:

$$J_{\text{эн}} = B_u \rho \cdot \frac{I_a}{\tau} \cdot C_u \cos \alpha, \quad (11)$$

где I_a – амплитуда импульсов тока, ρ – удельное электрическое сопротивление компонента, B_u – подвижность иона, τ – скважность импульсов тока, C_u – концентрация ионов реакционно-активного компонента в расплаве, α – угол между векторами электрического поля и диффузионного потока.

Суммарный поток частиц при совместной активации энергией УЗ и электрического полей равен:

$$J = -D' \frac{\partial C}{\partial x} + B_u \rho \cdot \frac{I_a}{\tau} \cdot C_u \cos \alpha + \nu \cdot \rho c \cdot \omega A \cdot S C_1 \cos \beta. \quad (12)$$

С учетом теплового эффекта в УЗ и электрическом полях суммарный поток частиц составляет

$$J = -D_0 \cdot e^{-\frac{E-\Delta E}{R \cdot T}} \cdot C^{T_0} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - (h/2)}{2 \cdot \sqrt{D_0 \cdot e^{-\frac{E-\Delta E}{R \cdot T}} \cdot t}} \right) \right] +$$

$$+ B_u p \cdot \frac{I_a}{\tau} \cdot C u \cos \alpha + v \cdot \rho c \cdot \varpi A \cdot S C_1 \cos \beta. \quad (13)$$

Из уравнения (13) следует, что активация энергией УЗ поля приводит к росту коэффициента диффузии, а электрического поля – к росту суммарного потока ионов реакционно-активных компонентов в зоне взаимодействия, а следовательно, и к увеличению скорости и глубины диффузии. Стимулирование процессов диффузии реакционно-активных компонентов в паяном соединении должно приводить к увеличению переходной зоны на границе припой–паяемые материалы и к образованию химических соединений между компонентами припоя и паяемыми материалами, что увеличивает механическую прочность соединений, повышает их качество и эксплуатационную надежность изделий.

Для моделирования диффузионных процессов по уравнению (13) разработана программа на языке C++ версии 2.01 фирмы Borland International. Исходными данными являлись: параметры диффузии (коэффициент диффузии, начальная концентрация, граничная глубина диффузии и время диффузии), параметры УЗ активации (амплитуда колебаний, подвижность частиц вещества под действием УЗ поля, частота колебаний, скорость звука в материале, площадь контакта), а также параметры электрического поля (подвижность ионов, удельное электрическое сопротивление реакционно-активного компонента, концентрация ионов, амплитуда и частота импульсов тока).

Моделировался процесс взаимной диффузии компонентов припоя и паяемого материала при формировании соединений припоем ПОЦ 10 с алюминиевым сплавом АМц при следующих граничных условиях: площадь контактирования 10–50 мм², амплитуда УЗ колебаний 10–20 мкм, скорость звука и плотность алюминиевого сплава 6200 м/с и 2,7·10³ кг/м³ соответственно, амплитуда импульсов тока 1–10 А, частота импульсов 1–10 Гц, граничная глубина диффузии 0–20 мкм, время диффузии 5–15 с, удельное электрическое сопротивление сплава 0,028·10⁻⁶ Ом/м, частота УЗ колебаний 22 и 44 кГц.

Результаты моделирования показывают, что УЗ активация увеличивает концентрацию диффундирующих элементов Zn и Al на граничной глубине в среднем на 15–20%, а совместная активация УЗ и электрическим полями – на 30–45% (рис. 2). С повышением амплитуды и частоты УЗ колебаний наблюдается прирост концентрации, так как при этом увеличивается количество энергии, поглощаемой расплавом. Совместная активация системы расплав–паяемый материал энергией УЗ колебаний и мощными импульсами тока дополнительно увеличивает тепловую энергию [6], что позволяет ускорить достижение температуры пайки, увеличить смачиваемость припоем поверхности материалов и повысить тем самым производительность процесса.

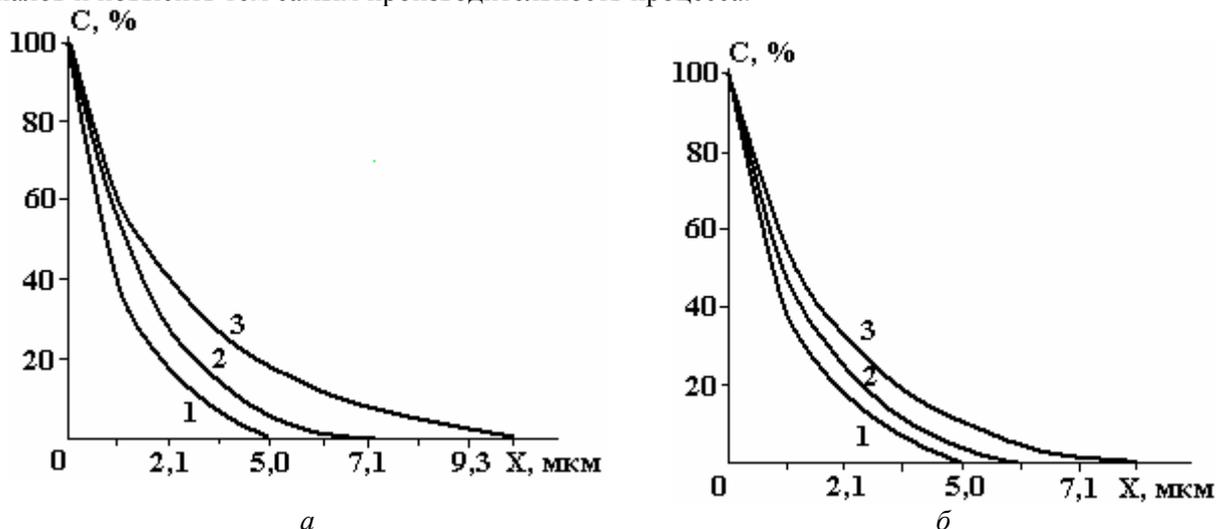


Рис. 2. Концентрационные профили диффузии в УЗ и электрическом полях. 1 – нагрев; 2 – УЗ; 3 – УЗ + ток 10 А. А, мкм: а – 20, б – 10

Структура паяного соединения и локальный рентгеноспектральный анализ элементного состава исследовались на электронном микроскопе Stereoscan-360 (Cambridge Instruments, Great Britain) с энергетическим спектрометром AN-10000 (Link, Great Britain) при ускоряющем напряжении 30 кВ и увеличении $\times 10000$ в режиме отраженных и вторичных электронов с фоторегистрацией результатов и получением псевдоцветного изображения. Рентгеноспектральный анализ элементного состава, выполненный локально в точках диаметром 1 мкм при чувствительности 0,5%, показал рост интенсивности пиков Al при токовой активации процесса диффузии (рис. 3).

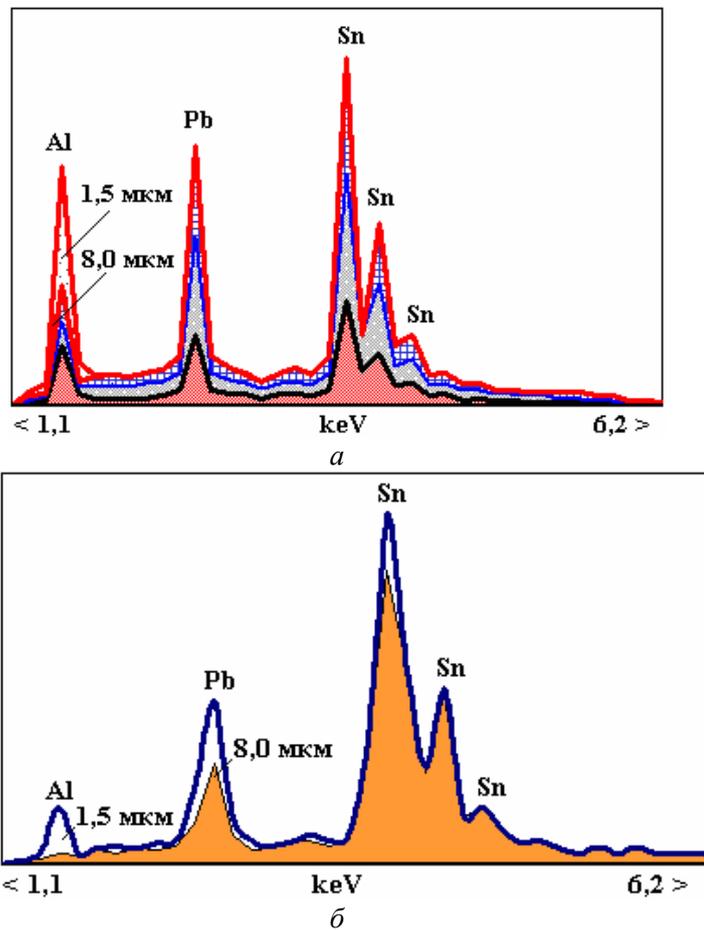


Рис. 3. Результаты локального рентгеноспектрального анализа паяных соединений: а – активация в УЗ и электрическом полях, б – ультразвуковая активация

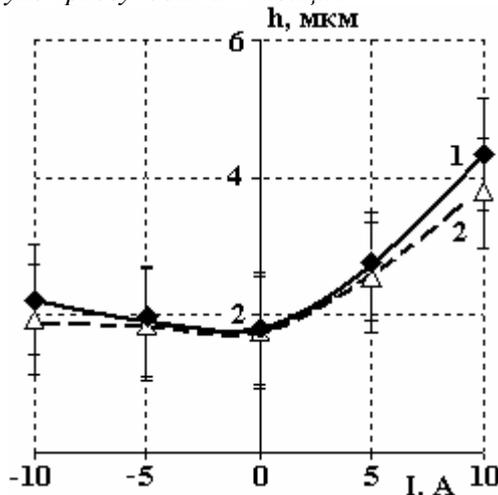


Рис. 4. Зависимости ширины переходной зоны от направления и величины импульсов тока. 1 – ПОЦ 10; 2 – ПОС 61

Ширина диффузионной зоны, измеренная с помощью растрового электронного микроскопа, в этом случае составляла 4–5 мкм для припоев ПОЦ 10 и ПОС 61 (рис. 4). Для припоя ПОЦ 10 диффузионная зона была несколько больше из-за наличия в расплаве электроподвижного цинка, который

мигрировал к межфазной границе и далее в глубь алюминиевого сплава, увеличивая ширину диффузионной зоны. Ширина переходной зоны растет до 6–8 мкм за счет роста диффузионного взаимодействия и электромиграции алюминия в припой (рис. 5,а) по сравнению с 1,5 мкм при УЗ активации (рис. 5,б).

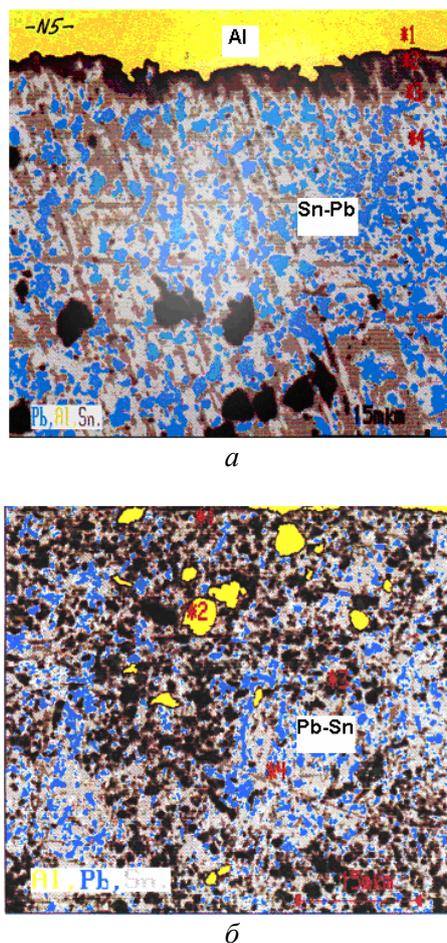


Рис. 5. Микроструктура паяных соединений Al–(Sn–Pb) в ультразвуковом (а) поле, а также ультразвуковом и электрическом полях (б)

При пропускании тока в обратном направлении прочность соединений практически не увеличивалась, так как олово и свинец, составляющие припой, не обладают такой подвижностью, как алюминий. Ширина диффузионной зоны при этом составляла около 2 мкм.

Механизм электродиффузии предполагает воздействие на термически возбужденный ион силы «электронного ветра», которая возрастает с увеличением плотности тока, и ионы алюминия перемещаются к положительному полюсу, увеличивая толщину диффузионного слоя, а вакансии – к отрицательному.

Токовая активация приводит к уменьшению переходного сопротивления для металлов, обладающих малым удельным сопротивлением и склонных к электромиграции, например для алюминия. Переходное сопротивление паяных соединений снижается на 60–70 %, а в дальнейшем начинает слабо увеличиваться. Снижение переходного сопротивления объясняется протеканием диффузионных процессов между компонентами припоя и детали и улучшением процесса смачивания. Дальнейший рост переходного сопротивления происходит за счет интенсивного окисления компонентов припоя и основного металла, а также образования интерметаллидов [7].

Практическая проверка результатов моделирования совместного воздействия энергии УЗ и ЭМ полей выполнена при формировании соединений из сплава АМц с использованием припоев ПОС 61 и ПОЦ 10. Исследование прочности соединений от времени действия УЗ поля при различных направлениях УЗ колебаний (рис. 6) показало, что в случае продольных колебаний она достигает 10 МПа, при параллельных колебаниях – 20 МПа за 15–20 с [8]. При меньшем времени не успевают развиваться процессы разрушения оксидных пленок и смачивания поверхности вывода, при большем – прочность падает за счет эрозии паяемого материала и окисления припоя. Пропускание импульсов

тока через зону формирования соединения в направлении от припоя к паяемому материалу повышает прочность соединений в 1,25–1,5 раза за счет увеличения ширины диффузионной зоны и электромиграции алюминия в припой.

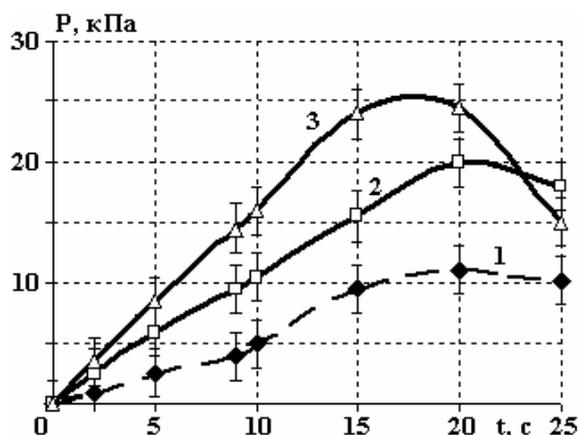


Рис. 6. Зависимости прочности соединений от времени воздействия и вида колебаний: 1 – продольные, 2 – параллельные, 3 – при воздействии электрического поля

Моделирование процессов диффузии и их верификация позволили определить пути роста скорости и глубины диффузии реакционно-активных компонентов при совместной активации энергией УЗ и электрического поля и улучшить тем самым механические и электрофизические свойства соединений. Совместная активация увеличивает концентрацию диффундирующих элементов на граничной глубине в среднем на 30–45%, а повышение частоты УЗ колебаний на 5–7%. Таким образом, совместная УЗ и токовая активация процессов формирования соединений с труднопаяемыми металлами увеличивает диффузию компонентов в зоне взаимодействия, что обуславливает увеличение прочности паяных соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кундас С.П., Ланин В.Л., Тявловский М. Д., Достанко А.П. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. Т.1 / Под общ. ред. А.П. Достанко. Минск, 2002. С. 267–285.
2. Румак Н.В., Бондарик В.М., Ланин В.Л. Электрические эффекты в жидкостях и расплавах под воздействием ультразвуковых колебаний // Докл. АН Беларуси. 1994. Т. 38. № 2. С. 115–118.
3. Lanin V.L. Electrical phenomena's in liquids and melts by ultrasound processing // Proc. 3rd Conf. on Applications o Power Ultrasound in Physical and Chemical Processing. 13 –14 December 2001. Paris. 2001. P. 143–146.
4. Бондарик В.М., Ланин В.Л. Прочностные свойства соединений, полученных ультразвуковой пайкой // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 1998. № 3–4. С. 33–37.
5. Бондарик В.М., Ланин В.Л. Физическая модель комбинированной ультразвуковой пайки // Ультразвуковая техника и технология: Материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БАТУ, 1999. С. 115–119.
6. Ланин В.Л. Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии при пайке в электронике // Электронная обработка материалов. 2002. № 2. С. 17– 20.
7. Lanin V.L., Bondarik V.M. Electrical resistance of soldering joints at effect of ultrasonic oscillations // Proc. of the 20th Int. Conf. on Electrical Contacts. 19–23 June 2000. Stockholm, Sweden. 2000. P. 205–208.
8. Ланин В.Л. Моделирование процессов диффузии при совместном воздействии ультразвуковых и электромагнитных полей // Докл. НАН Беларуси. 2005. Т.59. № 1. С. 49–52.

Поступила 28.12.07

Summary

Modeling and experimental researches of diffusion processes at soldering connections formation under influence of energy ultrasonic and electric fields establish increase in concentration diffusion elements on boundary depth on 30–45% that raises durability of connections with difficult soldering metals in 1,25–1,5 times.