

Ультразвуковая микросварка межсоединений с повышенной прочностью в интегральных схемах

Качество микросварных соединений в интегральных схемах определяется как физико-химическими свойствами соединяемых поверхностей, так и методами активации процессов микросварки. Активация импульсами электрического тока в процессе микросварки обеспечивает повышение прочности соединений в 1,2–1,4 раза.

**Владимир Ланин
Нгуен Жа Виен**

Введение

Ультразвуковая сварка (УЗС) проволочных выводов — один из наиболее широко применяемых способов создания неразъемных соединений между различными элементами, в частности для присоединения полупроводникового кристалла к внешним выводам корпуса прибора. При УЗС соединение двух материалов, находящихся в твердом состоянии, происходит при незначительном нагреве с приложением определенного давления и колебаний ультразвуковой частоты. При этом температура нагрева в зоне контакта не превышает 50–60% температуры плавления свариваемых материалов. Контактное давление зависит от механических свойств свариваемых материалов и размеров соединяемых элементов [1].

Процесс 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 при формировании микросварного соединения без большой деформации проволоки и значительного нагрева [2].

При УЗС не используют флюсы и припои, что является важным достоинством. Этим способом можно соединять разнородные, разнотолщинные и трудно свариваемые материалы. С помощью УЗС хорошо свариваются электродные выводы из Au, Al, Ag на силлале, на алюминиевой пленке, нанесенной на стекло, оловянные и оксидно-кремниевые, золотые и медные проволочные выводы интегральных схем (ИС) с золотым покрытием. В установках УЗС применяются различные системы передачи УЗ-колебаний. Для приварки проволочных выводов и микросхем обычно применяют УЗ продольно-поперечную колебательную систему с инструментом, совершающим колебания изгиба.

Повышение частоты УЗ-колебаний для сварки микропроводников следует рассматривать как возмож-

ность снизить величину амплитуды колебаний без изменения акустической мощности. В свою очередь понижение амплитуды колебаний уменьшает знакопеременные напряжения в свариваемых материалах и опасность усталостного разрушения, вероятность которого особенно велика при сварке тонких проводников. Следует предположить, что увеличение частоты колебаний позволит повысить темп роста и значение температуры в зоне сварки и обеспечить процесс формирования соединений за меньшее время и при меньшей температуре нагрева изделия. Выбор частоты резонанса зависит от конструктивных размеров сварочных головок оборудования и возможности его модернизации [3].

Качество микросварных соединений может быть повышено благодаря фотохимическим и термохимическим реакциям на поверхности алюминиевой пленки, иницируемыми при обработке импульсным оптическим излучением в среде осушенного воздуха и аргона. Изменение микрорельефа поверхностей и структуры материалов, наличие оксидных и адсорбированных пленок приводит к дестабилизации процессов микросварки, ухудшению качества и надежности сварных соединений, снижению производительности операции микросварки. Таким образом, качество микросварных соединений определяется как физико-химическими свойствами соединяемых поверхностей, так и методами активации процессов микросварки.

Для повышения прочности микросварных соединений по различным покрытиям корпусов ИС используется активация процесса УЗС импульсами электрического тока, при которой прочность микросварных соединений увеличивается для различных типов покрытий корпусов интегральных схем. Для повышения качества и надежности микросварных соединений в процессе УЗ-микросварки корпусов ИС, не содержащих драгоценных металлов, пропускали электрический ток через проволоку, контактную площадку и внешний вывод корпуса в направлении,

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

Таблица 2. Параметры моделирования процесса диффузии алюминия в никель

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

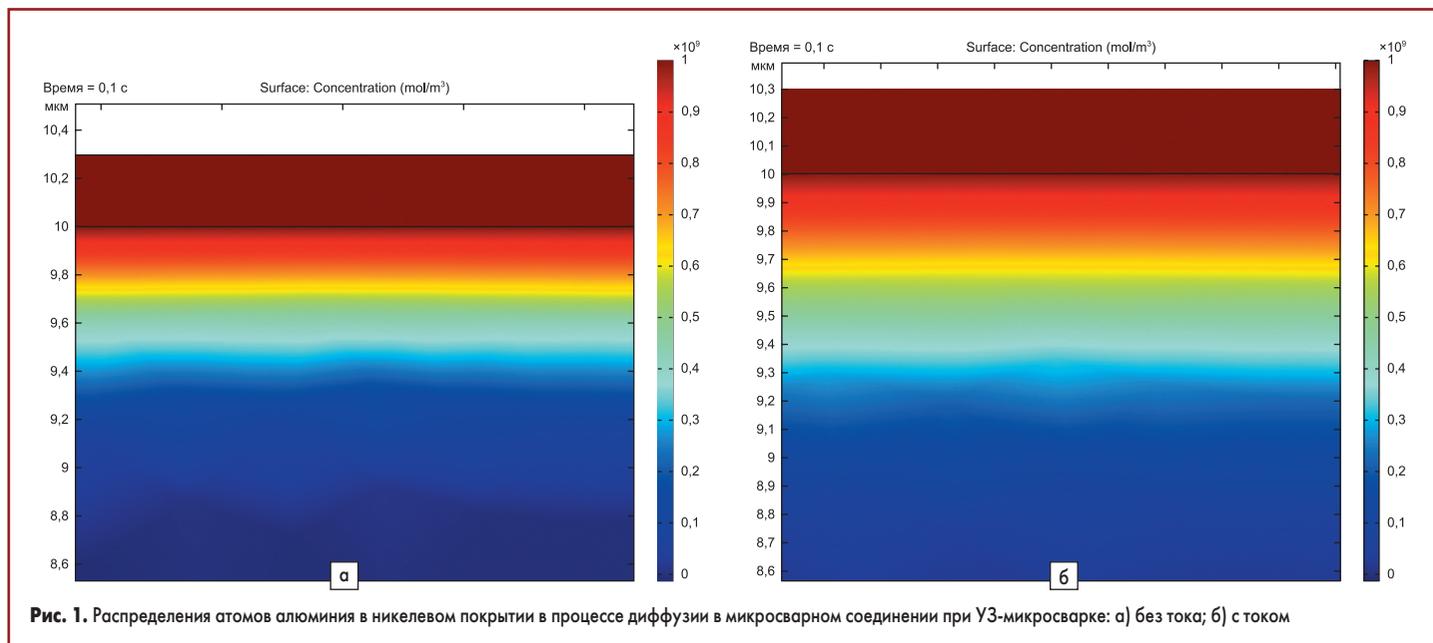


Рис. 1. Распределения атомов алюминия в никелевом покрытии в процессе диффузии в микросварном соединении при УЗ-микросварке: а) без тока; б) с током

обеспечивающем электроперенос диффузионно-подвижного металла в соединении, и величиной, превышающей порог начала электродиффузии [4].

Моделирование процесса диффузии в микросварном соединении

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 [5].

Исследование процесса диффузии в микросварном соединении Al-Ni (Al — проволока, Ni — материал покрытия 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 вызывает рост коэффициента диффузии и активирует процесс зарождения [6]:

$$D = D_0 e^{-((E_a - \Delta E)/kT)}, \quad (2)$$

где D_0 — предэкспоненциальный множитель; E_a — энергия активации диффузии; ΔE —

изменение энергии активации диффузии в УЗ-поле; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Расчитать энергию активации диффузии можно по следующим формулам [7]. Эффективная энергия атома, приходящаяся на один валентный элемент:

$$Q_0 = P_0 / (2r_i n), \quad (3)$$

где P — пространственно-энергетический параметр взаимодействующих атомов; r_i — координатное число; 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 B в среде атомов элемента A .

Для вычисления энергии активации процесса диффузии на границе Al-Ni использованы данные объемной самодиффузии атомов (табл. 1).

Из таблицы 1 и уравнения (4) получим $E_a = 2,2574$ эВ.

Изменение энергии активации диффузии в УЗ-поле составит:

$$\Delta E = 1/2(m\omega^2 A^2), \quad (5)$$

где ω — частота колебаний; A — амплитуда колебаний; m — масса соединения.

- При $\omega = 96\,000$ Гц, $A = 2$ мкм $\Rightarrow \Delta E = 1,68$ эВ.
- При $T = +100$ °C \Rightarrow
 $\Rightarrow D = D_0 e^{-((E_a - \Delta E)/kT)} \approx 3,38 \times 10^{-8}$ см²/с.
 Глубина диффузии может быть ориентировочно определена:

$$d = \sqrt{D \times t}, \quad (6)$$

где t — время диффузии.

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

Плотность импульса тока активации, протекающего через микросварные соединения для диаметра проволоки 80 мкм, составила:

- при $I = 0,3$ А $\Rightarrow J \approx 19,48$ А/мм²,
- при $I = 0,6$ А $\Rightarrow J \approx 38,96$ А/мм².

Процессы электродиффузии в контактных соединениях заметны при плотностях тока с 10 А/мм². Моделирование процесса диффузии в микросварном соединении при УЗ-микросварке 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/м³, параметры для моделирования в программе Comsol Multiphysics показаны в таблице 2.

Распределения атомов алюминия в никелевом покрытии контактных площадок в процессе диффузии в микросварном соединении при УЗ-микросварке без активации и с активацией импульсами электрического тока величиной 0,6 А показаны на рис. 1, а зависимости концентрации атомов диффузии от глубины — на рис. 2.

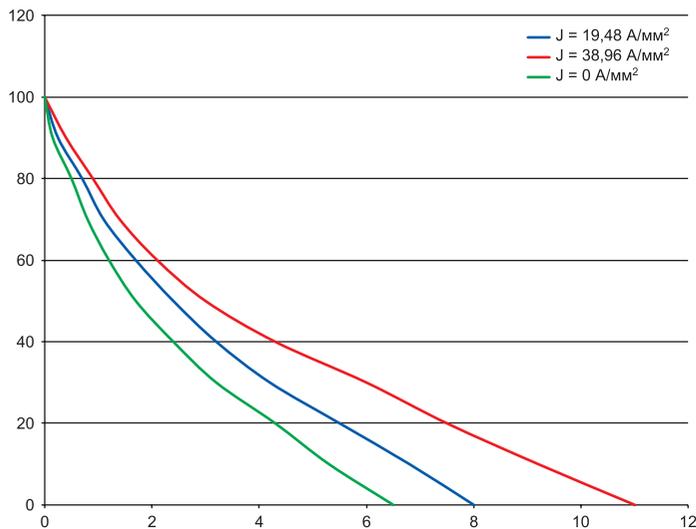


Рис. 2. Зависимости концентрации атомов Al от глубины диффузии и плотности импульсов тока

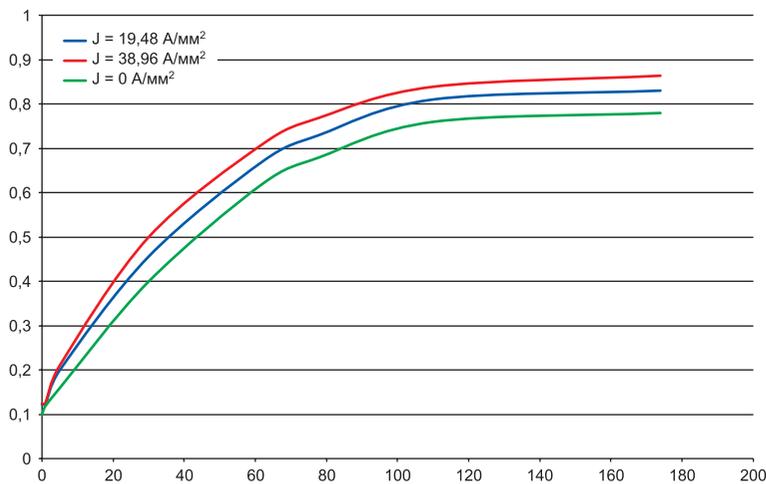


Рис. 3. Зависимости плотности диффузии атомов Al от времени микросварки и плотности импульсов электрического тока

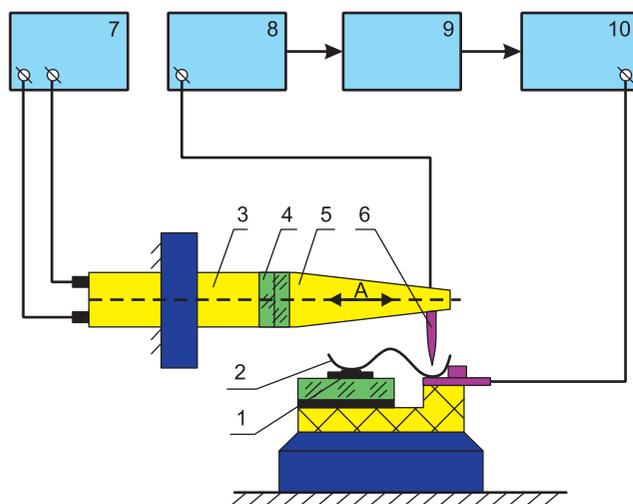


Рис. 4. Схема активации УЗС импульсами электрического тока:
 1 — контактная площадка; 2 — проволочный вывод; 3 — система крепления;
 4 — пьезоэлектрический преобразователь; 5 — волновод; 6 — сварочный капилляр;
 7 — генератор УЗ-колебаний; 8 — блок питания; 9 — блок управления; 10 — блок токовой активации

На рис. 1 и 2 видно, что глубина диффузии атомов Al без активации составляет всего $\approx 0,6$ мкм, а с токовой активацией $I = 0,6$ А — 1,1 мкм. Таким образом, можно сделать вывод, что при активации импульсами электрического тока глубина диффузии и концентрация диффундирующего в никель алюминия могут увеличиться почти в 2 раза. Зависимости плотности атомов диффузии от времени микросварки в точке, находящейся от границы 0,15 мкм на расстоянии показаны на рис. 3. Поскольку в соединении Al-Ni алюминий обладает большим коэффициентом диффузии, чем никель, то пропускание постоянного электрического тока через соединение стимулирует процесс диффузионного взаимодействия в процессе микросварки.

Экспериментальная часть

Схема УЗ-микросварки с активацией импульсами электрического тока показана на рис. 4.

При микросварке алюминиевой проволоки (2) к контактной площадке (1) корпуса ИС один из полюсов блока токовой активации подавался на акустический трансформатор УЗ технологической системы, а другой подключался к внешнему выводу ИС. Длительность импульса тока составляла 30–60 мс.

Качество микросварных соединений оценивали по внешнему виду и испытанием на прочность полученных перемычек тянущим усилием с помощью крючка, как показано на рис. 5. При этом усилие равно:

$$F = F_1 + F_2 \text{ при } \beta_1 = \beta_2 = 30^\circ. \quad (7)$$

Для присоединения выводов из алюминиевой проволоки увеличенного диаметра 80–255 мкм методом УЗ-сварки использовалась установка ЭМ-4320 (рис. 6), которая 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.

Универсальность установки обеспечивается «портальным» расположением сварочной системы по отношению к обрабатываемому изделию, наличием встроенных технологических блоков, а также быстросменных сварочных головок для каждого из видов сварки. Техническая характеристика установки присоединения выводов ЭМ-4320 приведена в таблице 3 [8].

Прочность микросварных соединений проверялась на установке контроля прочности проволочных и объемных выводов в ИС

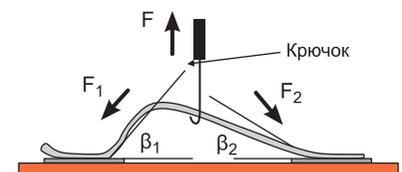


Рис. 5. Схема испытаний на прочность перемычек тянущим усилием



Рис. 6. Установка присоединения выводов ЭМ-4320 с блоком токовой активации

Таблица 3. Технические характеристики установки присоединения выводов ЭМ-4320

Рабочее поле перемещения стола, мм: - грубое (вручную) - точное (манипулятором)	150 15
Размер столика с подогревом, мм	65×65
Температура рабочей зоны стола, °С	до +300
Усилия сжатия соединяемых элементов, Н: - статическое - электромагнитное	0,1–2,5 0,03–1
Воспроизводимость усилия сжатия	До 10%
Рабочая частота УЗГ, кГц	96 ±5%
Габаритные размеры, мм	700×700×700
Масса, кг	До 110

ЭМ-6705 (рис. 7). Перемещение тестируемых приборов и приложение рабочих нагрузок выполнялось трехкоординатным приводом на шаговых двигателях. Это позволило обеспечить точность позиционирования испытываемого прибора, возможность дозирования нагрузки и повторяемость выполнения однотипных тестов.

В ходе теста проволоочный вывод прибора цеплялся инструментом-крючком и перемещался вниз до разрыва. Измеритель фиксировал

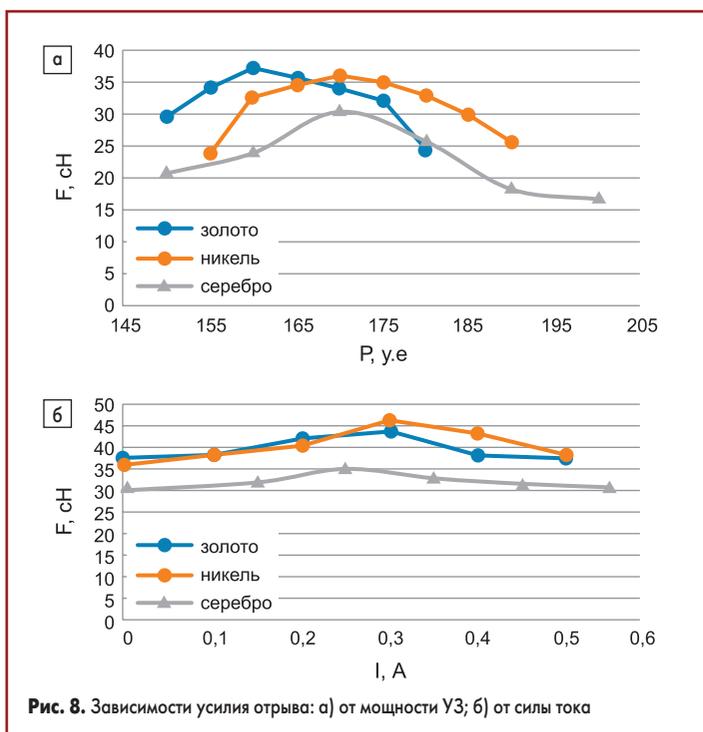


Рис. 8. Зависимости усилия отрыва: а) от мощности УЗГ; б) от силы тока



Рис. 7. Установка контроля прочности проволоочных и объемных выводов в интегральных схемах ЭМ-6705

Таблица 4. Техническая характеристика установки контроля прочности проволоочных и объемных выводов ЭМ-6705

Измеряемое усилие, кг	0,001–5 (10)
Рабочее поле столика для тестируемых изделий, мм	250×250
Скорость теста по оси Z, мм/с	До 5
Перемещение по оси Z, м	65
Интерфейс передачи данных RS-232	USB
Отображение результатов	LCD-монитор
Система наблюдения за объектом	Микроскоп, видеокамера
Габаритные размеры, мм	1100×755×620
Масса, кг	70

усилие при разрыве проволоки. Тестирование позволяет определить усилие при разрыве проволоки и величину ее удлинения. Техническая характеристика установки контроля прочности проволоочных и объемных выводов ЭМ-6705 приведена в таблице 4 [9].

Для экспериментов применялась проволока из алюминия диаметром 80 мкм и корпуса ИС с покрытиями никелем 6 мкм, золотом 3 мкм и серебром 6 мкм. Результаты измерений усилия отрыва соединений в процессе УЗ-микросварки увеличивается и достигает 44 сН для золота и 46 сН для никеля. С ростом величины тока прочность микросварных соединений увеличивается и достигает максимума при 200–300 мА при диаметре микропроволоки 80 мкм. При дальнейшем увеличении тока происходит пережигание микропроволоки, что приводит к уменьшению прочности соединения.

Для проволоки диаметром 300 мкм и серебряного покрытия получена диаграмма разрыва вывода (рис. 9). Усилие разрыва увеличивается до максимальной прочности микросварного соединения 420 г.

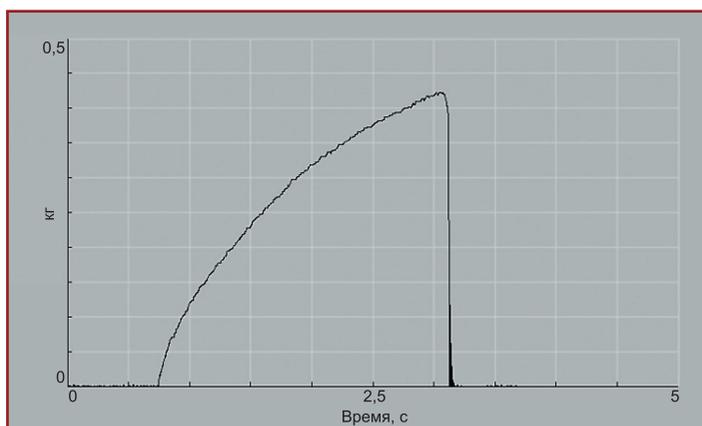


Рис. 9. Диаграмма разрыва вывода диаметром 300 мкм при тесте прочности

Выводы

В процессе присоединения выводов интегральных схем важной проблемой становится повышение качества микросварных соединений при воздействии УЗ-колебаний, которое определяется как физико-химическими свойствами соединяемых поверхностей, так и методами активации процессов микросварки. Применение активации импульсами электрического тока в процессе УЗС обеспечивает повышение прочности соединений в 1,2–1,4 раза. При активации импульса электрического тока концентрация диффундирующего элемента и глубина диффузии увеличиваются, что приводит к повышению прочности микросварного соединения. Применение активированных процессов УЗ-микросварки позволяет получать более стабильные по качеству микросварные соединения с различными типами покрытий контактных площадок. ■■■

Литература

1. Погорельцев И. Некоторые методы повышения качества и надежности ультразвуковой сварки // Силовая электроника. 2010. № 1.
2. Maria V. Ultrasonic welding of aluminum: a practical study in consistency, part marking and control modes. Iowa State University, 2017.

3. Ланин В., Петухов П. Повышение качества микросварных соединений в интегральных схемах с использованием ультразвуковых систем повышенной частоты // Технологии в электронной промышленности. 2010. № 1.
4. Ланин В. Активация процессов ультразвуковой микросварки изделий электроники // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 1.
5. Макаров С. В. и др. Формирование диффузионной зоны на границе раздела биметалла никель-алюминий. Барнаул, Алтайский государственный университет, 2018.
6. Ланин В. Л. Активация процессов формирования паяных соединений энергией ультразвуковых и электрических полей // Электронная обработка материалов. 2008. № 3.
7. Соловьев С. Д., Кораблев Г. А., Кодолов В. И. Расчет энергии активации объемной диффузии и самодиффузии элементов в твердых телах // Химическая физика и мезоскопия. 2005. Т. 7. № 1.
8. Установка присоединения выводов ЭМ-4320.
www.kbtem.by/products/wire-bonding/em-4320u
9. Установка контроля прочности проволочных и объемных выводов в интегральных схемах ЭМ-6705.
www.kbtem.by/products/wire-bonding/em-6705