

УДК.624.315.21

А. В. ФРОЛОВ

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ МОНТАЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЯХ ПОСРЕДСТВОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ

Исследованы особенности процесса монтажа радиоэлектронных систем (РЭС) методом ультразвуковой сварки, показавшие, что монтаж РЭС на алюминий-полиимидной основе методом ультразвуковой сварки в настоящее время является наиболее предпочтительным, т.к. позволяет получить более надежные монтажные соединения разнотолщинного алюминия без предварительного снятия окисных пленок там, где использование контактной сварки и пайки практически затруднено либо невозможно. Рассмотрено влияние технологических режимов (мощности ультразвукового генератора, амплитуды колебаний сварочного наконечника (инструмента), сварочного усилия и времени сварки) на надежность монтажных микросоединений.

Ключевые слова: монтаж, ультразвук, полиимид, сварка, надежность, технологические режимы, микросоединение.

Введение

Гибкие коммуникационные структуры (ГКС) являются очень распространённым способом организации межсоединений в современной электронной аппаратуре. Тенденция к дальнейшему расширению их использования в радиоэлектронных изделиях обусловливается большими преимуществами, которые они создают в технике межсоединений. Особый интерес представляет использование в конструкциях радиоэлектронных изделий алюминий-полиимидных ГКС, благодаря своим преимуществам, открывающим совершенно новые возможности перед разработчиками аппаратуры.

В производстве гибких коммутационных структур (ГКС) широко используются технологические процессы сборки и монтажа. Для обеспечения надёжности конструкции ГКС, особенно в микроэлектронном исполнении, существует потребность в реализации необходимых конструктивно-технологических характеристик монтажных соединений [1-4].

1. Анализ литературы

Ультразвуковая сварка является одним из основных методов формирования межсоединений металлических проводников. Благодаря целому ряду весьма ценных технологических свойств, например возможности соединения разнородных и разнотолщинных металлов, в ряде случаев без снятия окисных пленок (сварка алюминиевых проводников), она нашла широкое применение в приборостроении,

в том числе и в технологическом процессе сборки радиоэлектронных систем (РЭС) на основе алюминиевых ГКС.

Ультразвуковая сварка металлических микропроводников основана на использовании энергии механических колебаний сварочного наконечника. Колебания совершаются с ультразвуковой частотой свыше 16 кГц и амплитудой колебаний на уровне 0,5-50 мкм. Энергия в зону сварки вводится посредством сварочного усилия, которое находится в пределах $(0,1 \div 1,0) \sigma_T$ свариваемого материала (σ_T – предел текучести материала).

Процесс образования сварного монтажного соединения характеризуется сложным взаимодействием многочисленных и разнородных факторов. С одной стороны, это комплекс явлений, связанный с интенсивными процессами внешнего трения, повышения температуры в свариваемых материалах, расстрескиванием твердых и выгоранием жировых пленок, повышением пластичности, обмятием микро- и макронеровностей, сближением контактирующих поверхностей на расстояние, близкое к межатомному, и т. п. С другой стороны – это комплекс явлений, связанных с состоянием, способностью энергетического тракта подать эту энергию в зону сварки.

Основными величинами, определяющими перенос энергии в зону сварки, являются колебательные напряжения и скорости, возникающие на сварочном наконечнике и, в конечном счете, в зоне сварки.

Основными технологическими параметрами режима сварки металлических проводников являются

ся мощность ультразвукового генератора, амплитуда колебаний сварочного наконечника (инструмента) $\xi_{\text{св}}$, сварочное усилие $F_{\text{св}}$ и время сварки.

Кроме того, с учетом малых толщин и размеров соединяемых элементов в микроэлектронных изделиях, по сравнению со сваркой обычных конструкционных материалов, к основным параметрам следует отнести частоту колебаний инструмента. При этом для конкретной сварочной установки частота является постоянной величиной, изменяемой только в узких пределах [6, 7].

Одним из наиболее важных параметров является электрическая мощность, подводимая к преобразователю [8]. Электрическая мощность определяет мощность, поглощаемую в зоне сварки (акустическую мощность) от которой зависит качество соединения. Следует отметить, что увеличение электрической мощности при постоянной амплитуде колебаний необходимо при переходе к сварке от пластичных к более твердым металлам.

Амплитуда колебания и период микросварки дает большее представление об акустической мощности, чем электрическая мощность преобразователя. Поэтому увеличение амплитуды колебаний ведет к увеличению акустической мощности в зоне сварки.

Амплитуда колебаний имеет оптимальное значение для каждого свариваемого материала определенной толщины. Для образования сварного соединения необходима определенная амплитуда, которая вызывает в месте соединения сдвиговое напряжение, способное преодолеть силу трения, вызываемую сжатием соединяемых элементов. При малых значениях амплитуды колебаний инструмента, сварное соединение не образуется. С ростом амплитуды при постоянстве остальных параметров режима сварки прочность соединений возрастает. Однако при больших значениях амплитуды колебаний инструмента свариваемые элементы могут разрушиться.

Значительное влияние на прочность монтажно-го соединения при ультразвуковой микросварке оказывает усилие сжатия, которое обуславливает возникновение тангенциальных напряжений в месте сварки [7, 8]. Оптимальное усилие сжатия увеличивается с увеличением толщины свариваемых элементов и размера сварного соединения и существенно зависит от подводимой мощности. Чем больше усилие сжатия, тем больше должна быть амплитуда колебаний инструмента и необходимая электрическая мощность.

Если мощность установки превышает необходимую для сварки данного материала определенной толщины или диаметра, то увеличение усилия сжатия приводит к чрезмерной деформации сварной точки и снижению прочности соединения.

В случае недостаточного усилия сжатия не достигается необходимое сцепление между инструментом и верхней свариваемой деталью. Происходит проскальзывание инструмента по детали, сварного соединения не образуется.

При рассмотрении взаимосвязи амплитуд колебаний инструмента и усилия сжатия с точки зрения постоянства выделения энергии в зоне сварки рекомендовано с увеличением амплитуды колебаний инструмента при заданной механической мощности ультразвуковой колебательной системы снижать усилие сжатия. Отмечается, что усилие сжатия должно увеличиваться пропорционально амплитуде колебаний инструмента при соответствующем увеличении мощности колебательной системы.

Рядом исследователей [5, 9] установлено, что длительность сварки увеличивается с толщиной материала, твердостью и уменьшением электрической мощности. Отмечено, что существует экстремальный характер зависимости прочности сварочных микросоединений от длительности сварочного цикла. Уменьшение прочности при длительном времени микросварки объясняется в большинстве случаев увеличением общей деформации и появлением трещин в зоне сваривания.

Энергия ультразвуковых колебаний зависит от амплитуды и частоты следующим образом:

$$E = \xi ft, \quad (1)$$

где ξ – амплитуда колебаний при микросварке;

f – частота колебаний при микросварке;

t – время микросварки.

Данные параметры показывает, что при сохранении необходимого для сварки уровня мощности уменьшение амплитуды колебаний можно компенсировать соответствующим повышением частоты.

Кроме того установлено, что высокое качество соединений при ультразвуковой микросварке достигается при определенном соотношении всех параметров режима.

Необходимая для микросварки длительность включения ультразвука определяется амплитудой колебаний и усилием сжатия.

Амплитуда колебаний связана с колебательной скоростью V соотношением:

$$V_{\text{св}} = 2\pi/\xi_{\text{св}}. \quad (2)$$

Для выявления взаимодействия этих величин целесообразно использовать усредненные эквивалентные величины – эквивалентную силу и сопротивление нагрузки.

Если амплитуду колебаний сварочного наконечника $\xi_{св}$ отнести ко всей колебательной системе в целом и оперировать активной составляющей нагрузки, то получим:

$$P_{св} = 0,5(2\pi f \xi_{св})^2 R_{эқв} k_1, \quad (3)$$

где $R_{эқв}$ – усредненное эквивалентное сопротивление нагрузки;

k_1 – обобщенный безразмерный коэффициент связи системы с нагрузкой.

Эквивалентная колебательная сила, возникающая в зоне сварки, зависит от сопротивления нагрузки. Сопротивление нагрузки является следствием взаимодействия разнородных факторов: изменения свойств свариваемых материалов и поверхностных пленок, поверхности волнового фронта, характера контактирования сварочного наконечника с деталями и деталей между собой и опорой и т. п. и зависит, при прочих равных условиях, от контактного давления сварочного наконечника на свариваемые материалы. Можно записать $F_{эқв} = f(F_{сд})$.

Эквивалентная сила $F_{эқв}$ может быть связана со сварочным усилием посредством обобщенного безразмерного коэффициента k_2 :

$$F_{эқв} = k_2 F_{св}, \quad (4)$$

где k_2 – коэффициент, учитывающий особенности колебательной системы, ее потери, характер сопротивления нагрузки.

Используя вышеприведенные уравнения, получим выражения, связывающие усилие сварочного наконечника в зависимости от его скорости колебаний, мощности колебательной системы и сопротивления нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} P_{св} &= \pi f \xi_{св} F_{эқв}; & P_{св} &= \pi f \xi_{св} k_2 F_{св}; \\ F_{св} &= P_{св} / (k_2 \pi f \xi_{св}); & \xi_{св} &= P_{св} / (k_2 \pi f F_{св}). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Как следует из приведенных уравнений, при заданной мощности с увеличением $\xi_{св}$ контактное усилие, которое можно приложить к сварочному наконечнику, падает. Повышение $F_{св}$ при заданной $\xi_{св}$ можно осуществлять только при соответствующем увеличении мощности колебательной системы.

Сварочное усилие зависит от твердости свариваемого материала:

$$F_{св} = f(\alpha; HB), \quad (6)$$

где α – коэффициент;

HB – твердость материала по Бринеллю.

Известна связь между пределом твердости и пределом текучести материала:

$$HB \approx \beta \sigma_T. \quad (7)$$

Сварочное усилие при ультразвуковой сварке должно подчиняться условию:

$$F_{св} \leq \sigma_T S_{св}.$$

Или можно записать:

$$F_{св} \approx \alpha \beta \sigma_T S_{св}.$$

Площадь ввода энергии определяется диаметром сварочного наконечника. Диаметр сварочного наконечника зависит от толщины свариваемых материалов δ , т. е. $d = f(\delta)$. Установим между ними связь в виде коэффициента γ (м), т. е. $d \rightarrow S_{сд} \rightarrow \delta$, тогда:

$$\xi_{св} = P_{св} / (k_2 \pi f \alpha \beta \gamma \delta \sigma_T). \quad (8)$$

2. Цель работы

Как было сказано ранее, на сегодняшний день наиболее перспективным методом получения монтажных соединений в микроэлектронике является ультразвуковая сварка [1]. По сравнению с другими методами формирования соединений метод сварки при помощи ультразвука обладает целым рядом преимуществ: простотой использования; технологичностью; широкими возможностями для автоматизации технологического процесса монтажа. Кроме того, прочность сварного микросоединения близка к прочности исходных соединяемых элементов микросхем; сварное соединение имеет минимальное омическое сопротивление; основные параметры процесса соединения (температура нагрева, удельное давление и длительность выдержки) являются минимальными, что позволяет исключить повреждения элементов схемы; ультразвуковая сварка позволяет выполнять соединение материалов разнообразных сочетаний и типоразмеров; после соединения не остаётся материалов, вызывающих коррозию. Однако влияние технологических факторов на процесс образования сварных соединений может привести к отклонению их параметров от ожидаемых.

Поэтому целью работы является детальное рассмотрение влияния технологических факторов на надежность соединений в ГКС методом ультразвуковой сварки.

3. Экспериментальные исследования

Формирование монтажных соединений осуществлялось на автоматической установке ультразвуковой сварки ЭМ-4370, позволяющей осуществлять прецизионный высокоплотный монтаж в автоматическом режиме. В качестве рабочего инструмента при выполнении монтажа использовалась игла для ультразвуковой сварки типа ИУ1-130-21. Рабочий торец сварочного инструмента выполнен в виде крестообразных канавок. Этим обеспечивается получение надежного механического контакта вывода со сварочным инструментом.

Для анализа надёжности монтажа исследовалось влияние на эту характеристику основных параметров (факторов) процесса: усилия нагружения (сжатия), мощности и времени сварки.

Оценку надёжности сварного монтажного соединения проводили по прочности соединения на отрыв.

В условиях формирования сварного микросоединения алюминиевых выводов гибкой коммутационной структуры экспериментально установлено, что толщина слоя алюминиевой металлизации на ГКС должна быть не менее 10 мкм. Уменьшение толщины ведет к снижению прочности сварного соединения микровыводов ГКС (рис. 1).

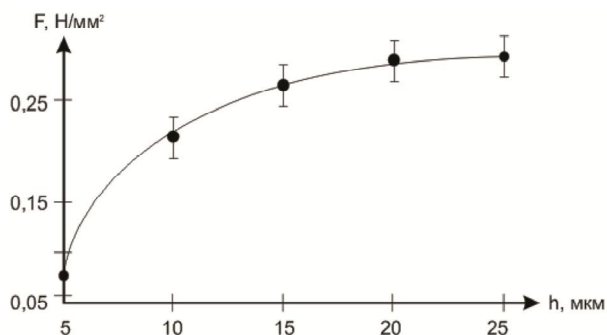


Рис. 1. Зависимость прочности микросоединения от толщины слоя алюминия на полиимидной подложке

Формирование соединения в реальном масштабе времени ранее исследовалось с помощью регистрации осциллограмм, изменения температуры в зоне сварки, контактного электросопротивления на границе раздела инструмент-проводник или проводник-проводник, записи акустической эмиссии (рис. 2, 3).

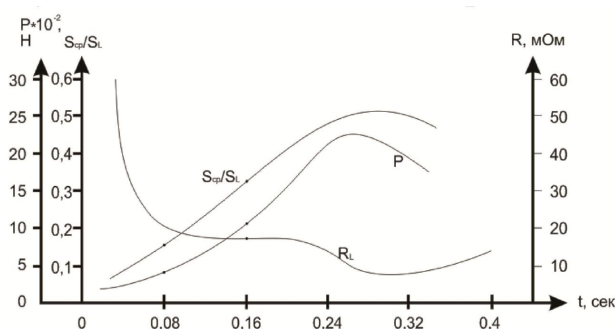


Рис. 2. Характер изменения прочности (P) и электросопротивления (R_k) контакта, отношения площади сварного соединения ($S_{св}$) к общей площади контакта S_k от времени (t) для контактных пар Al-Al при ультразвуковой микросварке

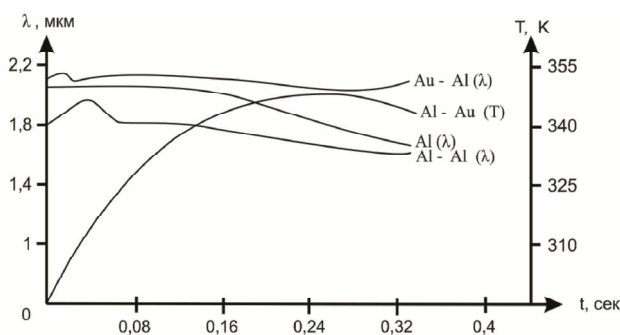


Рис. 3. Характер изменения температуры T и амплитуды колебаний (λ) для контактных пар при ультразвуковой сварке на кремниевой подложке

Формирование соединений при ультразвуковой микросварке подобных образцов можно представить следующим образом. До включения ультразвуковых колебаний под действием статически приложенной нагрузки на инструмент из-за деформации проводника создается некоторая первоначальная площадь контактирования по разнице раздела инструмент-металлический проводник и металлический проводник-металлический проводник.

После включения ультразвуковых колебаний в результате активирующего действия ультразвука, снижающего предел текучести алюминия, облегчается пластическая деформация проводника и идет интенсивная осадка его, о чем свидетельствует резкое возрастание ширины контакта и интенсивности акустической эмиссии. При этом из-за наличия канавки (канавок) на рабочем инструменте процессы трения сначала идут, в основном, на контактной поверхности металлический проводник-металлический проводник, что и подтверждают экспериментальные данные по резкому возрастанию и последующему спаду R_k (см. рис. 2).

На этой стадии в зоне трения происходит значительное тепловыделение, которое резко повышает температуру в зоне сварки (см. рис. 3), способствуя ускоренной пластической деформации проводника.

Таким образом, ультразвуковые колебания при сварке, прежде всего, создают условия для быстрого формирования физического контакта. Одновременно с этим происходит активация контактных поверхностей, приводящая к образованию очагов взаимодействия в условиях пластической деформации алюминия.

При наличии ультразвуковых колебаний в зоне контакта резко возрастают касательные напряжения за счет интенсивного перемещения трущихся поверхностей, что приводит к локализации пластической деформации в поверхностных слоях и резкому градиенту плотности структурных дефектов у контактной поверхности.

Под действием структурной и термической активации в зоне трения образуются первые дискретные очаги взаимодействия, разрастающиеся затем в результате протекания диффузионных процессов, которые значительно ускоряются в условиях пластической деформации проводника и трения его по поверхности контакта с одновременным наложением ультразвукового поля. Естественно предположить, что при ультразвуковой микросварке под влиянием необычайно больших пластических деформаций в приконтактных слоях и кратковременных температурных всплесков, возникающих в зоне трения, первые очаги взаимодействия образуются при относительно небольшом увеличении температуры. Контакты, полученные за такие малые времена сварки, обладают уже некоторой прочностью, но суммарная площадь очагов взаимодействия при этом мала (см. рис. 2).

В дальнейшем, с увеличением площади контактирования и плотности очагов взаимодействия, сопротивление перемещению металлического проводника верхнего слоя относительно микропроводника нижнего слоя возрастает настолько, что, в основном, происходит перемещение инструмента уже относительно верхнего проводника. При этом резко возрастает падение напряжения на границе раздела инструмент-проводник. Эта граница и является теперь источником тепла. Следует отметить, что температура в зоне сварки под действием обоих источников тепла, которые как бы меняются местами, все время растет до определенного момента (см. рис. 3).

Характерно, что при достижении максимальной температуры в зоне сварки происходит вторичная осадка проводника. Это хорошо подтверждается резким падением напряжения, а также резким падением R_k . Кроме того, этому временному интервалу соответствует наиболее интенсивный рост площади

SCB, ($S_{св}/S_k$) и, соответственно, прочности сварки P (см. рис. 2). Причем максимальный прирост прочности сварки происходит, в основном, за время активной деформации проводника. Перегибы на кривых R_k соответствуют задержке по деформации проводника из-за деформационного упрочнения алюминия в процессе первичной осадки и резкого уменьшения удельного давления сварки из-за прироста площади контактирования свариваемых материалов при постоянной величине нагрузки на сварочный инструмент.

Заключение

Таким образом, исходя из рассмотренных закономерностей формирования микросоединения в процессе ультразвуковой сварки можно сделать вывод, что прочность и надежность соединений на заданном в технической документации уровне обеспечивается технологическими факторами: усилием нагружения, мощностью импульса, временем сварки, а также свариваемыми материалами с соответствующими физико-химическими свойствами. Оптимальный режим процесса микросварки характеризуется достижением максимальной прочности соединения при минимальном электрическом сопротивлении контакта. При этом заметное влияние на параметры режима сварки оказывает состояние поверхности используемых материалов, соотношение размеров зоны контактной микросварки и микропроводников, конструктивные параметры гибкой коммутационной структуры.

Литература

1. Невлюдов, И. Ш. Анализ влияния конструктивно-технологических факторов на кинетику формирования сварного микросоединения [Текст] / И. Ш. Невлюдов, И. С. Хатюк // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2012. – Вып. 1. – С. 13–17.
2. Алюминиевая “Chip on flex” (COF) технология в радиационном приборостроении [Текст] / Н. В. Замирец, В. Н. Борцев, А. М. Листратенко, В. А. Антонова, Л. П. Семенов, М. А. Проценко, И. Т. Тымчук // Технология приборостроения. – 2007. – № 2. – С. 3–9.
3. Гуськов, Г. Я. Монтаж микроэлектронной аппаратуры [Текст] / Г. Я. Гуськов, Г. Л. Блинов, Л. Л. Азаров. – М. : Радио и связь, 1986. – 175 с.
4. Tricomi, A. The CMS Inner Tracker Silicon Microstrip Modules: Production and test [Text] / A. Tricomi // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. – 2007. – № 1,

Vol. 570 (2). – P. 248–252. – doi: 10.1016/j.nima.2006.09.050.

5. Грачѳв, А. А. Ультразвуковая микросварка [Текст] / А. А. Грачѳв, А. П. Кожевников, В. А. Лебига. – М.: Энергия, 1977. – 184 с.

6. Балабанов, В. Т. Технология создания плоских микромодулей для приборов бесконтактной идентификации [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.06 / В. Т. Балабанов; Московский гос. ин-т электронной техники. – М., 2008. – 26 с.

7. Заводян, А. В. Анализ сборочно-монтажных процессов производства электронных средств

[Текст] / А. В. Заводян, А. М. Грушевский. – М.: МИЭТ, 2005. – 200 с.

8. Jiromaru, T. Ultrasonic Welding of Electronic Parts and Devices Using a Long and Thin Complex Transverse Vibration Welding Tip [Text] / T. Jiromaru // EICE Technical Report. – 2014. – Vol. 114, № 363. – P. 29-34.

9. Konovalov, S. I. Effect of electrical circuits on duration of an acoustic pulse radiated by a piezoplate [Text] / S. I. Konovalov, A. G. Kuz'menko // J. Acoust. Soc. Am. – 2009. – Vol. 125 (3). – P. 1456-1460. – doi: 10.1121/1.3075582.

Поступила в редакцию 29.06.2015, рассмотрена на редколлегии 11.09.2015

ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ МОНТАЖНИХ З'ЄДНАНЬ У РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ВИРОБАХ ЗА ДОПОМОГОЮ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

А. В. Фролов

Досліджено особливості процесу монтажу радіоелектронних засобів (РЕЗ) методом ультразвукового зварювання, що показало, що монтаж РЕЗ на алюміній-поліімідній основі методом ультразвукового зварювання в цей час є найбільш кращим, тому що дозволяє одержати більш надійні монтажні з'єднання різновтовщинного алюмінію без попереднього зняття окисних плівок там, де використання контактного зварювання і пайки практично ускладнене або неможливе. Розглянуто вплив технологічних режимів (потужності ультразвукового генератора, амплітуди коливань зварювального наконечника (інструмента), зварювального зусилля і часу зварювання) на надійність монтажних мікроз'єднань.

Ключові слова: монтаж, ультразвук, поліімід, зварювання, надійність, технологічні режими, мікроз'єднання.

FORMATION WIRING CONNECTIONS IN THE RADIO-ELECTRONIC PRODUCTS BY ULTRASONIC WELDING

A. V. Frolov

The features of the process of installation of radio electronic means by ultrasonic welding are investigated It show that the installation of radio-electronic means on an aluminum-polyimide-based method of ultrasonic welding is currently the most preferred by providing of more reliable mounting of the aluminum compound without prior removal of the oxide films where the usage of resistance welding and soldering are difficult or virtually impossible. The influence of technological conditions (power ultrasonic generator, the oscillation amplitude of the welding tip (tool), welding force and welding time) on the reliability of mounting micro connections are considered.

Keywords: installation, ultrasound, polyimide, welding, reliability, technological modes, micro connection.

Фролов Андрей Витальевич – канд. техн. наук, доц. каф. ТАПР, Харьковський національний університет радіоелектроніки, Харьков, Україна, e-mail: tar@kture.kharkov.ua.