

УДК.624.315.21

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА КИНЕТИКУ ФОРМИРОВАНИЯ СВАРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ

Д.т.н. И.Ш. Невлюдов, Н. П. Демская, к.т.н. Н.Г. Стародубцев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

В работе исследованы физико-химические процессы, наблюдаемые при формировании электрических межсоединений, полученных методом сварки ультразвуком при изготовлении гибких печатных плат.

У роботі досліджено фізико-хімічні процеси, спостережувані при формуванні електричних міжз'єднань, отриманих методом зварювання ультразвуком при виготовленні гнучких друкованих плат.

The physicochemical processes observed during the formation of electrical interconnections obtained by the method of ultrasonic welding in the manufacture of flexible printed circuit boards are investigated in the work.

Ключевые слова: кинетика, межсоединение, ультразвук, физико-химические процессы, теория разрушения твёрдых тел

Введение

На сегодняшний день наиболее перспективным методом получения монтажных соединений в электронной технике является ультразвуковая сварка. 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 конструктивно-технологических факторов на процесс образования сварных соединений может привести к отклонению их параметров от ожидаемых.

Поэтому целью является детальное рассмотрение влияния конструктивно-технологических факторов на кинетику формирования сварных монтажных соединений в гибких коммутационных структурах (ГКС) методом ультразвуковой сварки.

Основная часть

Качество и надёжность соединений металлических микровыводов модулей электронной техники (ЭТ) на

основе алюминиевых ГКС во многом определяется правильным выбором конструктивно-технологических параметров сварных узлов, обеспечением металлургической совместимости, высокой электропроводности, механической прочности и минимизацией напряженно-деформированного состояния.

Физические основы процесса образования неразъемных сварных соединений алюминиевого проводящего слоя в производстве ЭТ достаточно полно изучены [1-4].

Большинство исследователей [1, 3] констатируют факт, что прочность и надёжность соединения типа *Al-Al* характеризуются высокими показателями вследствие отсутствия гетерогенных диффузионных процессов в процессе сварки и при последующем температурном старении. Так, при ускоренных испытаниях (выдержка при 300°C в течение 150 час) целостность сварных соединений типа *Al-Al* сохраняется, а при отрыве проволоки происходит разрыв в месте перехода вывода в сварное соединение. Металлографический анализ косых микрошлифов показал, что зона взаимодействия типа *Al-Al* имеет металлический блеск и незначительные включения окислов алюминия [4].

Однако при чрезмерной деформации выводов (более 60%) и при непараллельности поверхности вывода относительно торца инструмента имеет место (до 4%) предельно низкое усилие на отрыв – $9 \cdot 10^{-2}$ Н.

В условиях использования автоматизированного ультразвукового сварочного оборудования применение микропроволоки с большим разбросом по сечению приводит к нестабильности прочности контактов [3, 4]. Изменение сечения проводников при сварке при заданных технологических режимах влияет на прочность соединений потому, что удельное давление на свариваемые элементы изменяется вследствие изменения степени деформации. При заданных режимах микросварки существует определенный предел деформации микропроволоки, когда удельное давление становится равным удельному сопротивлению пластической деформации.

В то же время использование плоских ленточных выводов в конструкции изделий микроэлектроники вместо проволоки позволяет во многом избежать проблем, связанных с переменным сечением проволоки (диаметр 30 мкм), так как ширина ленточного вывода (фольги) составляет 100-200 мкм и фактор разнотолщинности сглаживается за счет интегральной картины сварного соединения. К тому же ленточный вывод гибкого носителя поступает на сварочный

монтажный стол в готовом виде и не подвергается внешним воздействиям протяжных механизмов, как в случае подачи проволоки.

В настоящее время алюминиевые сплавы характеризуются хорошей технологичностью, при обработке давлением легко прокатываются в виде фольги толщиной 20-30 мкм. Известно [5], что надёжность соединения, полученного ультразвуковой (УЗ) сваркой во многом определяется химическим составом алюминиевой фольги (рис. 1-2).

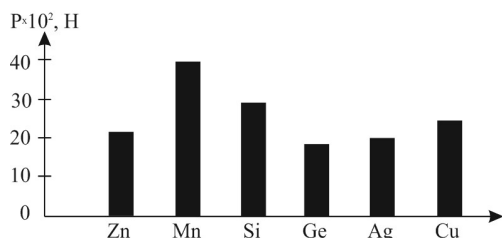


Рис. 1. Зависимость усилия отрыва сварного соединения алюминиевой фольги с ленточным выводом от вида легирующего элемента фольги [3,4]

При этом изменяются и механические свойства самой фольги (рис. 2).

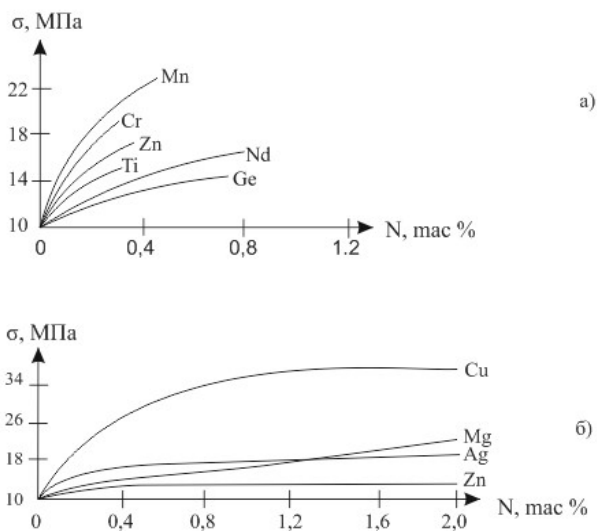


Рис. 2. Зависимость предела прочности алюминиевой фольги от концентрации (К) легирующих элементов; а) элементы с растворимостью до 0,8 %; б) элементы с растворимостью до 2 % [3, 4]

Однако наиболее оптимальным является многокомпонентное легирование.

Исходя из прочностных и экономических параметров, простоты освоения в промышленности, в проведенных экспериментах использована фольга А5Т по ГОСТ 11 069-74, получившая наибольшее распространение и которая в композиции с полиамидным покрытием серийно поставляется в виде материала ФДИ-А по БУ0.037. 042 ТУ.

В условиях формирования сварного микросоединения плоских алюминиевых выводов гибкой коммуникационной платы особых дополнительных требований к материалу КП по сравнению с

проволочным способом сборки ранее не обнаружено [3, 5]. Однако, экспериментально установлено, что толщина слоя алюминиевой металлизации на ГКП должна быть не менее 10 мкм. Уменьшение толщины ведет к снижению прочности сварного соединения микровыводов ГКС (рис. 3).

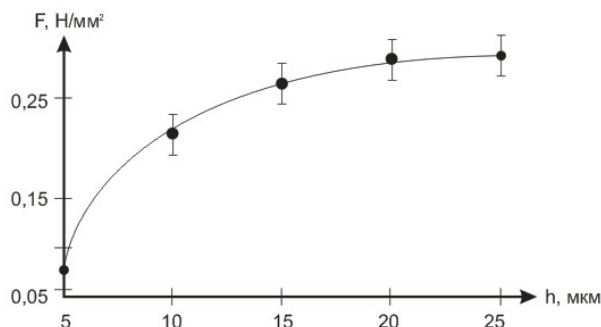


Рис. 3. Зависимость прочности микросоединения от толщины слоя алюминия на полиамидной подложке [4]

Процесс соединения проволочных выводов с металлизированными контактными площадками на полиамидной подложке изучен достаточно полно [3-6]. Для случая соединения ленточных выводов картину кинетических закономерностей формирования соединения, в основном, следует считать идентичной за исключением некоторых допущений, связанных с геометрией привариваемого вывода и профилем торца инструмента. Кинетика формирования соединения в реальном масштабе времени ранее подробно изучалась [3, 4] с помощью регистрации осциллограмм, изменения температуры в зоне сварки, контактного электросопротивления на границе сварочный инструмент-проводник или проводник-проводник, записи акустической эмиссии (рис. 4 - 5).

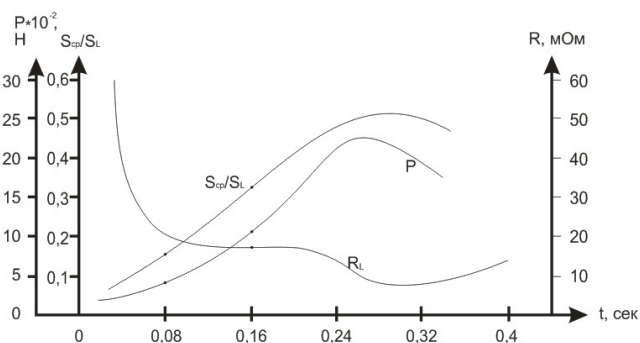


Рис. 4. Характер изменения прочности (P) и электросопротивления (R_k) контакта, отношения площади сварного соединения (S_{св}) к общей площади контакта S_к от времени (t) для контактных пар Al-Al при УЗ-микросварке

Кинетику формирования соединения при УЗ сварке 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 границам раздела инструмент-проволока и проволока-контактная площадка.

После включения УЗ 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 проволока-контактная площадка, что и подтверждают экспериментальные данные по резкому возрастанию и последующему спаду R_k (рис. 4). На этой стадии в зоне трения происходит значительное тепловыделение, которое резко повышает температуру в зоне сварки (рис. 5), способствуя ускоренной пластической деформации проводника.

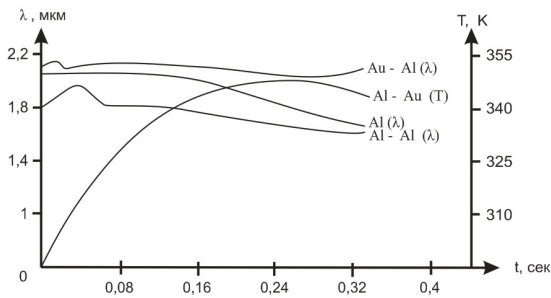


Рис. 5. Характер изменения температуры T и амплитуды колебаний (λ) для контактных пар при УЗ сварке [3]

Таким образом, УЗ-колебания при монтаже, 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 и упругой деформации полиамидной подложки. При осадке алюминиевого проводника окисная пленка на нем растрескивается и в зону контакта выходит чистый алюминий, растекание которого по поверхности способствует удалению из зоны сварки загрязнений и осколков окисных пленок.

При наличии УЗ-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 [3, 5]. Естественно предположить, что при УЗ сварке 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. Наличие первых очагов взаимодействия при очень малых временах сварки подтверждается экспериментально с помощью металлографических исследований [3, 4], и, кроме того, контакты, полученные за такие малые времена сварки, обладают уже некоторой прочностью, но суммарная площадь очагов взаимодействия при этом мала (рис. 4).

В дальнейшем, с увеличением площади контактирования и плотности очагов взаимодействия, сопротивление перемещению микропроводника 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 (рис. 5).

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 «проводник-полиимид». Кроме того, этому временному интервалу соответствует наиболее интенсивный рост площади S_{ce} , (S_{ce}/S_k) и, соответственно, прочности сварного соединения P (рис. 4). Причем максимальный прирост прочности сварного соединения 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. С увеличением параметров УЗ сварки отдельные стадии процесса накладываются друг на друга.

Значительный интерес представляют исследования по изучению характера прочности монтажного микросоединения во времени с одновременным изменением деформации выводов. Проводились исследования [4, 5, 7] ультразвуковой сварки алюминиевого ленточного вывода из материала марки А-995Д сечением (242×18) мкм² с алюминиевым проводящим слоем ГКП. Деформация измерялась по изменению ширины ленточного вывода в зоне сварки через определенные промежутки времени, а затем рассчитывалась скорость деформации. Максимальная скорость деформации (рис. 6) соответствует максимальной прочности микросварного соединения, при этом площадь активной зоны достигает наибольших размеров.

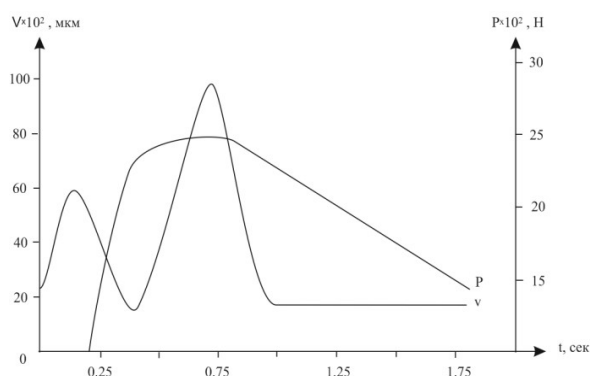


Рис. 6. Зависимость скорости деформации (v) и прочности сварного соединения (P) от времени сварки [3]

Так как прочность сварного микросоединения определяется скоростью деформации, то, очевидно, пластичность вывода должна быть максимальной. В этой связи проводились исследования режимов отжига [3, 5], обеспечивающих максимальную пластичность. Исследованию подвергались выводы из алюминия марки А-995Д, имеющие круглое и прямоугольное сечение. Температура отжига была кратна 100 К. Время отжига составляло $1,8 \times 10$ с. Среда отжига – воздух и водород. Испытания образцов на разрыв и на определение их пластичности проводились на разрывной установке при скорости растяжения 16×10^{-6} м/с.

Установлено [4], что максимальная пластичность выводов (8%) достигается при температуре отжига 573 К, а среда отжига существенного влияния на исследуемые механические свойства не оказывает. Кроме того, следует отметить, что установленная температура отжига, соответствующая максимальной пластичности выводов, соответствует температурному интервалу рекристаллизации для алюминия высокой чистоты 563-583 К [8], что соответствует температурному интервалу имидизации полиимида при изготовлении полиамидных ГКС.

Выводы

Таким образом, исходя из рассмотренных закономерностей кинетики формирования микросоединения в процессе ультразвуковой сварки можно сделать вывод, что прочность и надёжность соединений на заданном в технической документации уровне обеспечивается рядом фаз протекания процесса:

– образованием первоначальной площади контактирования по границе раздела инструмент –

металлический проводник и границе раздела соединяемых металлических проводников;

– активирующего действия ультразвука, приводящего к пластической деформации и осадке проводника с резким возрастанием ширины контакта и интенсивности акустической эмиссии;

– резкому повышению температуры и пластической деформации проводника.

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 печатной платы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Борцев, В.Н. Исследование и выбор оптимальных технологических режимов сварки для автоматизации монтажа гибких алюминий-полиимидных микрокабелей / В.Н. Борцев, И.Ш. Невлюдов, М.А. Проценко, И.Т. Тымчук, И.С. Хатнюк // Научно-технический журнал «Технология приборостроения». – Харьков, 2011. – Вып. №1. – С. 3-8.
2. Борцев, В.Н. Исследование и выбор оптимальных технологических режимов изготовления гибких коммутационных структур для современных микроэлектронных структур / В.Н. Борцев, И.Ш. Невлюдов, М.А. Проценко, И.С. Хатнюк // Materials of the VII International conference “Strategy of Quality in Industry and Education”. – Varna, Bulgaria. – 2011. – С. 34-37.
3. Невлюдов И.Ш. Анализ влияния конструктивно-технологических факторов на кинетику формирования сварного микросоединения / И.Ш. Невлюдов, И.С. Хатнюк // Збірник наукових праць «Вісник гаціонального технічного університету “ХПІ”». – Харьков: НТУ “ХПІ”, 2012. – Вып. №1. – С. 13-18.
4. Балабанов, В. Т. Технология создания плоских микромодулей для приборов бесконтактной идентификации: автореф. дис. к.т.н. : / В. Т. Балабанов ; [Московский гос. ин-т электронной техники]. – М., 2008. – 26 с.
5. Грачёв, А. А. Ультразвуковая микросварка / А. А. Грачёв, А. П. Кожевников, В. А. Лебига. - М.: Энергия, 1977. - 184 с.
6. Работнов, Ю.Н. Введение в механику разрушения / Ю.Н. Работнов.- М.: Наука, 1987. - 80 с.
7. Назаров Г.В. Сварка и пайка в микроэлектронике / Г.В. Назаров, Н.В. Гревцов.- М.: Сов. радио, 1969. - 192 с.
8. Заводяна, А. В. Анализ сборочно-монтажных процессов производства электронных средств / А. В. Заводяна, А. М. Грушевский. - М.: МИЭТ, 2005. - 200 с.