

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГПП

Д.т.н. А.А. Андрусевич², к.т.н. Н.Г. Стародубцев¹, к.т.н. В.В. Невлюдова¹

1. Харьковский национальный университет радиоэлектроники

2. Криворожский колледж Национального авиационного университета, г. Кривой Рог

В работе исследованы физико-химические процессы, наблюдаемые при формировании и разрушении сварных соединений, полученных методом сварки ультразвуком при изготовлении гибких печатных плат.

У роботі досліджено фізико-хімічні процеси, спостережувані при формуванні і руйнуванні зварених з'єднань, отриманих методом зварювання ультразвуком при виготовленні гнучких друкованих плат.

In this work the physical and chemical processes observed in the formation and destruction of welded joints obtained by ultrasound welding in the manufacture of flexible printed circuit boards.

Ключевые слова: сварное соединение, ультразвук, физико-химические процессы, теория разрушения твёрдых тел.

Введение

Вопросы надежности приобретают все более высокую значимость в самых различных сферах человеческой деятельности. Особую ценность имеют решения проблем обеспечения надежности в промышленном производстве, где задача достижения требуемого качества изделий и производительности процесса их изготовления сопряжена с ограниченностью ресурсов и необходимостью минимизации их затрат.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что качество, точность, производительность и себестоимость изготовления радиоэлектронного изделия зависят от параметров (технологических режимов), надежности и управляемости процесса сборки и монтажа этого изделия. Даже при использовании самого прогрессивного сборочно-монтажного оборудования при несоблюдении режимов и низкой надежности процесса сборки и монтажа невозможно достичь высоких технико-экономических показателей выпускаемой радиоэлектронной продукции.

Гибкие печатные платы (ГПП) 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 ГПП, открывающих новые возможности перед разработчиками

радиоэлектронной аппаратуры благодаря своим преимуществам:

- динамической гибкости;
- уменьшению размеров конструкции;
- уменьшению веса (50-70% при замене проводного монтажа, до 90% при замене жестких плат);
- улучшению эффективности сборки;
- уменьшению стоимости сборки (уменьшению числа операций);
- увеличению выхода годных при сборке;
- улучшению надежности (уменьшению числа уровней соединений);
- улучшению электрических свойств (унифицированные материалы, волновое сопротивление, уменьшение индуктивности);
- улучшению рассеивания тепла (плоские проводники, рассеивание тепла на обе стороны);
- возможности трехмерной конструкции упаковки;
- совместимости с поверхностным монтажом компонентов (совместимость по коэффициенту расширения);
- упрощению контроля (визуального и электрического).

В практике современной технологии сборки радиоэлектронных изделий на основе алюминий-полиимидных ГПП в процессе монтажа широко применяется ультразвуковая (УЗ) микросварка. По сравнению с используемыми в радиоэлектронике другими методами монтажа ультразвуковая микросварка обладает целым рядом неоспоримых преимуществ:

- обладает широкими возможностями для автоматизации технологического процесса монтажа;
- обеспечивает возможность соединения разнотолщинных проводников без снятия оксидных пленок;
- позволяет достичь высокой производительности процесса монтажа;
- гарантирует стабильное достижение требуемых норм точности, что положительно отражается на качестве и надежности готовой продукции в целом;
- обеспечивает простоту и технологичность процесса сварки.

Для обеспечения надежности сварного соединения, а, следовательно, и конструкции ГПП существует потребность в исследовании физико-химических процессов, протекающих при формировании и разрушении сварных соединений, полученных методом сварки ультразвуком.

Постановка задачи

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 $(0,1 \div 1,0) \cdot \sigma_T$ 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, растрескиванием 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 мощность ультразвукового генератора, амплитуда колебаний сварочного наконечника (инструмента) ξ_{ce} , сварочное усилие F_{ce} 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 [1, 2].

Одним из наиболее важных параметров является электрическая мощность, подводимая к преобразователю [3]. 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 монтажного соединения при ультразвуковой микросварке оказывает усилие сжатия, которое обуславливает возникновение тангенциальных напряжений в месте сварки [3, 4]. 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 [2] 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

$$E = \xi \cdot f \cdot \tau, \quad (1)$$

где ξ – амплитуда колебаний при микросварке;

f – частота колебаний при микросварке;

τ – 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

$$V_{ce} = 2 \cdot \pi \cdot \xi_{ce} \cdot f \cdot \xi_{ce} \cdot R_{эке} \cdot k_1 \quad (2)$$

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

Если амплитуду колебаний сварочного наконечника ξ_{ce} отнести ко всей колебательной системе в целом и оперировать активной составляющей нагрузки, то получим

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

где $R_{эке}$ – 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 $F_{эке} = f(F_{cd})$.

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

$$F_{эке} = k_2 \cdot F_{ce} \quad (4)$$

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

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

Как следует из приведенных уравнений, при заданной мощности с увеличением ξ_{ce} контактное

усилие, которое можно приложить к сварочному наконечнику, падает. Повышение F_{ce} при заданной ξ_{ce} можно осуществлять только при соответствующем увеличении мощности колебательной системы.

Сварочное усилие зависит от твердости свариваемого материала

$$F_{ce} = f(\alpha; HB), \quad (6)$$

где α – коэффициент;

HB – твердость материала по Бринеллю.

Известна связь между пределом твердости и пределом текучести материала

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

Сварочное усилие при ультразвуковой сварке должно подчиняться условию

$$F_{ce} \leq \sigma_T \cdot S_{ce}.$$

Или можно записать

$$F_{ce} \approx \alpha \cdot \beta \cdot \sigma_T \cdot S_{ce}.$$

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. $d \rightarrow S_{cd} \rightarrow \delta$, тогда

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

Основой моделирования процессов разрушения сварного микросоединения может послужить теория разрушения твердых тел [5, 6], основные положения которой предполагают рассматривать процесс разрушения, как действие явлений ползучести, и хрупкого разрушения, возникающих при действии внешней силовой нагрузки, при этом возникают условия для превышения допустимого предела прочности.

Многие свойства материалов и, в частности, механические и диэлектрические свойства обнаруживают своеобразные особенности и, обусловленные частично замедленной реакцией материала на внешние воздействия. Всякая деформация материала под действием внешней силы не сопровождается мгновенной перестройкой внутренней структуры до состояния равновесия, отвечающего новым условиям. Для этого требуется некоторый промежуток времени, пока все частицы в соответствии с этими условиями придут в равновесие. Так, если быстро деформировать материал и поддерживать степень деформации постоянной, то необходимое для этого напряжение постепенно уменьшается (релаксация напряжения). Если же быстро деформировать материал, поддерживать постоянным напряжением, то некоторое время будет увеличиваться деформация (релаксация деформации). Таким образом, процесс перехода частиц в новое состояние равновесия, объясняющее ползучесть сопровождается релаксацией. В

рассматриваемом случае имеется в виду ослабление напряжения, созданного внешним воздействием [7].

Процесс разрушения протекает более или менее постепенно и для своего завершения требует определенного времени t_p . Это время, необходимое для развития процесса разрушения от момента нагружения тела до момента его разрыва, называется временной прочностью или долговечностью материала [7, 8].

Долговечность разрушаемого материала t_p , растягивающее напряжение σ и абсолютная температура T связаны следующим соотношением:

$$t_p = t_{p0} \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/kT], \quad (9)$$

где t_{p0} , U_0 , γ – постоянные, зависящие от природы и структуры материала.

Логарифмируя (9) получаем зависимость

$$\ln t_{p0} = \ln t_p + (U_0 - \gamma\sigma)/kT = \ln t_p + U_a/kT \quad (10)$$

где $U_a = U_0 - \gamma\sigma$ – энергия активации процесса разрушения.

Эти формулы проверялись на большом количестве разнообразных материалов (металлы, стекла, полимеры, кристаллы и др.) при изменении t_p на 10 порядков и изменении T в широких пределах [6]. Как показали опыты, t_{p0} у всех материалов приблизительно одинаково и равно примерно $10^{-12} \div 10^{-13}$ с т. е. близко к периоду колебаний атомов около положения равновесия. Построив зависимость $\ln t_p$, от $1/T$, для данного σ , можно экспериментально определить U_a . Установлено, что для металлов U_a хорошо совпадает с энергией сублимации, для полимеров – с энергией термической деструкции, т.е. с энергией разрыва химических связей.

Универсальность полученных закономерностей позволяет сделать вывод, что процесс разрушения твердого тела всегда имеет кинетический характер (т.е. протекает во времени) и природа его для всех тел одинакова.

Физический механизм этого процесса представляется в настоящее время следующим образом [5, 9].

Атомы твердого тела совершают тепловые колебания с периодами $t_{p0} \approx 10^{-12} \div 10^{-13}$ с. Под действием тепловых флуктуации время от времени происходит разрыв химических связей. Вероятность этого события, равная $\exp(-U_a/kT)$, зависит от высоты активационного барьера U_a и температуры T уменьшаясь с ростом U_a и понижением T . В отсутствие внешнего напряжения (при $\sigma = 0$) энергия, необходимая для разрыва связи, равна для металлов $U_o = Q_{субл}$. Напряжение σ , созданное в теле, уменьшает энергию активации процесса разрушения с U_o до $U_o = U_0 - \gamma\sigma$ и тем самым увеличивает вероятность разрыва связей, а следовательно и число разорванных связей в единице объема.

Образование субмикроскопических областей с разорванными связями и слияние их друг с другом приводит к тому, что тело под действием приложенного напряжения разрушается. Чем выше a , тем сильнее понижается энергия активации, тем быстрее и в большем количестве возникают разорванные связи, поэтому тем меньше требуется времени для развития процесса разрушения.

Таким образом, для обеспечения режима разрушения в отсутствие заметной ползучести необходимо лишь кратковременное незначительное увеличение напряжения над пределом прочности.

Теоретическая прочность твердых тел σ_0 , рассчитанная по той или иной атомистической модели, во много раз превосходит реальную прочность σ_p .

Принято считать, что такое различие между σ_p и σ_0 объясняется наличием в реальных твердых телах (металлических проводниках, кристалле микросхемы) различного рода дефектов, в частности микротрещин, снижающих их прочность [9]. Появление трещины длиной l , приводит к концентрации напряжений у ее краев, если к образцу приложено растягивающее усилие $F_{/вн}$ (рис. 1).

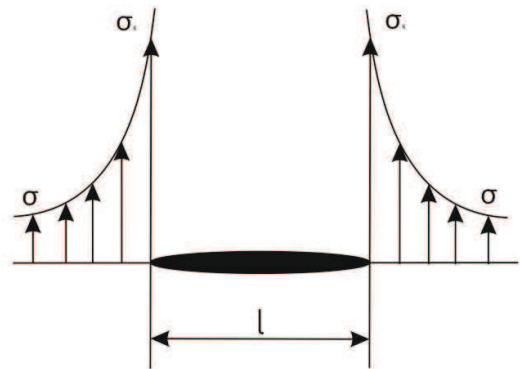


Рис. 1. Распределение напряжений у краев трещины

Величина напряжения у края острой трещины, имеющей радиус округления a определяется следующим соотношением:

$$\sigma_k = \sigma(1 + 2\sqrt{l/a}), \quad (11)$$

где σ_k – напряжение у края трещины;

σ – среднее напряжение в поперечном сечении образца.

Разрушение образца наступает при таком значении $\sigma = \sigma_p$ при котором напряжение σ_k достигает теоретической прочности материала σ_0

$$\sigma_k = \sigma_p(1 + 2\sqrt{l/a}) = \sigma_0. \quad (12)$$

Отсюда можно определить реальную прочность материала σ_p

$$\sigma_p = \frac{\sigma_0}{1 + 2\sqrt{l/a}} \approx \frac{\sigma_0}{2\sqrt{l/a}} \quad (13)$$

Из соотношения (13) видно, что реальная прочность тела тем ниже, чем длиннее возникшая в нем трещина и чем меньше радиус кривизны ее края.

Для того, чтобы σ_p составляла 0,01 σ_0 , достаточно возникновения в теле трещин размером $l=1$ мкм с радиусом закругления краев, равным параметру решётки. Таким образом, механизм разрушения монтажного соединения основан на зарождении и развитии трещин и микротрещин в среде сформировавшейся при образовании соединения содержащей дефекты микроструктуры. Значительная концентрация напряжений у краев трещины приводит к условиям, когда время разрушения материала становится значительно меньше времени релаксации, т.е. к обеспечению минимального влияния процесса разрушения на перестройку структуры материала в прилегающих к поверхности разрыва областях. Практически такие условия могут быть реализованы при таком режиме испытания микросоединения на прочность, когда значительные деформации достигаются за несколько секунд, что приводит к кратковременной ползучести, и процесс характеризуется хрупким разрушением.

При УЗ-сварке микропроводников на основе алюминиевых гибких коммутационных структур (ГКС) создаются достаточные условия для реализации такого механизма разрушения. Можно сделать предположение о наличии двух источников формирования среды, содержащей дефекты структуры: во-первых, частицы посторонних веществ; во-вторых, продукты физико-химических реакций на поверхности и в объеме исходных материалов образующих сварное соединение (МОС). Эти источники обладают большой интенсивностью на этапе активации МОС во время микромонтажа, особенно при отсутствии защитной среды.

Удаление посторонних веществ с поверхности алюминиевых микропроводников (тонкой оксидной и жировой плёнок) принципиально невозможно в реальных условиях монтажа, так как даже при идеальной очистке поверхности от минеральных и органических загрязнений поверхность металла обладает столь высокой активностью, что практически мгновенно покрывается тонким оксидным слоем, образующими на ней адсорбированные пленки.

Таким образом, можно предположить, что подготовленные для соединения поверхности являются достаточно мощным источником концентрации посторонних частиц, которые ослабляют прочность материала и определяют механизм начала процесса разрушения, возникновение и развитие трещин.

Значительный рост напряжения на концах развивающейся трещины обуславливает ослабление процессов ползучести и в сторону хрупкого разрушения. Развитие микротрещин происходит в слое материала, структура и свойства которого могут определяться характером физико-химического взаимодействия, в котором участвуют соединяемые поверхности, при участии внешних факторов, обуславливающих значительный вклад в несовершенство структуры и состава сварного микросоединения.

Выводы

Таким образом, исходя из рассмотренных закономерностей формирования микросоединения в процессе ультразвуковой сварки, можно сделать вывод, что прочность и надёжность соединений, на заданном в технической документации уровне, обеспечивается технологическими факторами. Оптимальный режим процесса микросварки характеризуется достижением максимальной прочности соединения при минимальном электрическом сопротивлении контакта

В свою очередь процесс разрушения рассматриваемый, как действие явлений ползучести и хрупкого разрушения, при условии превышения допустимого предела прочности напряжений, зависит от воздействия внешних сил.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Tricomi A. *The CMS Inner Tracker Silicon Microstrip Modules: Production and test // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment.* – 2007. – Vol. 570 (2), N 1. – P. 248-252.
2. Грачёв, А.А. *Ультразвуковая микросварка [Текст] / А. А. Грачёв, А.П. Кожевников, В.А. Лебига.* – Москва: Энергия, 1977. – 184 с.
3. Балабанов В.Т. *Технология создания плоских микромодулей для приборов бесконтактной идентификации [Текст] / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Московский гос. ин-т электронной техники.* – 2008.
4. Заводян, А.В. *Анализ сборочно-монтажных процессов производства электронных средств [Текст] / А.В. Заводян, А. М. Грушевский.* – Москва: МИЭТ, 2005. – 200 с.
5. Работнов, Ю.Н. *Введение в механику разрушения [Текст] / Ю.Н. Работнов.* – М.: Наука, 1987. – 80 с.
6. Кузнецов, А.О. *Прочность элементов микроразрывной аппаратуры [Текст] / А. О. Кузнецов, А. И. Погало, В.С. Сергеев.* – М.: Радио и связь, 1990. – 144 с.
7. Фролов, В.К. *Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств [Текст] / В.К. Фролов, Н.П. Сергеев.* – М.: Техносфера, 2003. – 504 с.
8. Андрусевич, А.А. *Технологический мониторинг монтажных соединений в производстве электронной техники [Текст]] : дис. ... канд. техн. наук / А.А. Андрусевич.* – Х., 2005. – 156 с.
9. Терлецкий, Я.П. *Статистическая физика [Текст] / Я. П. Терлецкий.* – М.: Высшая школа, 1973. – 278 с