

РАЗРУШЕНИЕ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ РАЗРУШЕНИЙ

Лозовой Игорь Александрович, Турецкий Андрей Владимирович

Воронежский государственный технический университет, Россия, Воронеж

e-mail: tav7@mail.ru

394026, Воронеж, ул. Московский пр-т, д.14, тел. (473) 243-77-06

В данной статье произведен обзор основных факторов влияющих на разрушение паяных соединений в электронной аппаратуре, приведены математические выражения для предварительного анализа максимальных механических напряжений, описана функция определения развивающихся дефектов.

Ключевые слова: припой, прочность, дефект, режим, интерметаллид.

Надежность всех электронных изделий зависит, как от надежности компонентов, так и от надежности механических, тепловых и электрических межсоединений между этими компонентами. Отдельное паяное соединение нельзя оценить по надежности; его надежность оценивается только в выполнении роли межсоединения элементов электронных компонентов с печатной платой. Таким образом, в соединении участвуют три элемента: контактная площадка печатной платы, галтель пайки и присоединительная поверхность компонента [1,2]. Характеристики этих трех элементов, участвующих в межсоединении компонента и монтажной подложки, в сочетании с характеристиками внешней среды определяют приемлемую вероятность отказа электронного оборудования, его надежность.

Пайка — абсолютно не гомогенная структура. Паяные соединения состоят из множества различных материалов: 1) покрытие контактных площадок печатной платы под пайку; 2) один или более интерметаллических составов — твердых растворов олова с металлом печатной платы; 3) промежуточный слой между слоевым интерметаллоидом и припоем со стороны платы; 4) припой, имеющий определен-

ную структуру зерна, состоящую по крайней мере из двух фаз: различных размеров кристаллов и межкристаллических прослоек, содержащих различные загрязнения; 5) промежуточный слой между слоем-интерметаллоидом и припоем со стороны компонента; 6) покрытие на поверхности пайки компонента.

Известны факторы, влияющие на надежность и прочность контактной пары, образованной паяным соединением: конструкция контактной пары; технология изготовления контактной пары; подводимая энергия; паяемость соединяемых поверхностей; соединяемые материалы; припой (паста) и флюс; геометрические параметры контактного соединения; давление; способ нагрева; геометрические размеры и соотношение размеров сторон корпуса элемента; соотношение ТКЛР материалов корпуса элемента и МО.

Отказы паяных соединений делятся на внезапные, параметрические и перемежающиеся [3]. По характеру проявления различают следующие отказы: явный обрыв, микроизлом, микроотслоения.

Одним из самых явных факторов, способствующий разрушению паяного соединения, является предельная механическая нагрузка.

При любых видах нагружения материалы испытывают два вида напряжений [4]: нормальные (растягивающие или сжимающие) и касательные (тангенциальные). При осевом растяжении стержня металла или припоя произвольной длины силой F нормальные растягивающие напряжения перпендикулярны поперечному сечению стержня и равны

$$\sigma = F/S,$$

а максимальные касательные напряжения направлены под углом 45° к оси растяжения и равны половине нормальных напряжений

$$\tau = 0,5\sigma.$$

При анализе паяных соединений относительные величины напряжений и их направления могут существенно отличаться от случая простого растяжения стержня.

В соответствии с этими двумя видами напряжений существуют и два макроотличных типа разрушения: разрушение путем отрыва от действия максимальных

нормальных напряжений и разрушение путем среза от максимальных касательных напряжений.

Прочность паяного соединения зависит от устойчивости к воздействию механических нагрузок его слабого звена. Таким слабым звеном могут являться в первую очередь дефекты формирования паяного соединения и его поверхности, непропаи, неспаи, общая или локальная эрозия основного металла, а также структурно-чувствительные дефекты — газовые и усадочные поры, кристаллизационные, релаксационные и термические трещины, прослойки хрупких химических соединений, флюсовые и шлаковые включения.

При расчетной оценке прочности паяных соединений необходимо учитывать сложный характер напряженного состояния под нагрузкой [4]. Примем, что напряжения в шве не превышают предела упругости припоя, чтобы использовать схему анализа клеевых и адгезионных соединений. При этом модуль упругости паяного шва E_1 меньше модуля упругости основного металла E .

В нахлесточных соединениях в результате относительного сдвига соединяемых элементов и искривления под действием изгибающего момента создаются касательные напряжения τ и нормальные напряжения σ_z и σ_y , неравномерно распределенные по длине и толщине нахлестки. При этом концентрация касательных напряжений тем выше, чем выше отношение E/E_1 . В зоне спаия (там, где образуется диффузионная зона, химические соединения и «прикристаллизованный» слой интерметаллидов) сдвиговые деформации максимальны, и в результате структурной неоднородности, возникающей при кристаллизации, они плохо передаются в толщу паяного шва и практически не релаксируют. Высокая концентрация напряжений приводит к отрыву припоя от основного металла.

При пайке таких соединений особое внимание следует уделять созданию качественного спаия, то есть выполнению всех условий надлежащего формирования паяного шва с симметричными и плавными галтелями, поскольку наибольшие значения касательных напряжений q приходятся на край галтели

$$q_{\max} = \frac{\alpha \rho}{2} \left(\sqrt{\frac{1 + ch(\alpha l_H)}{sh(\alpha l_H)}} \right),$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{2G}{E}} \cdot \frac{b}{F\delta}$$

Принимая из условий статической равнопрочности

$$l_H = 2t, F = b \cdot t,$$

получим

$$\alpha l = \sqrt{\frac{8G}{E}} \cdot \frac{t}{\delta}$$

Коэффициент концентрации напряжений

$$\beta = \frac{\alpha l}{2} \cdot \left(\frac{1 + ch(\alpha l)}{sh(\alpha l)} \right)$$

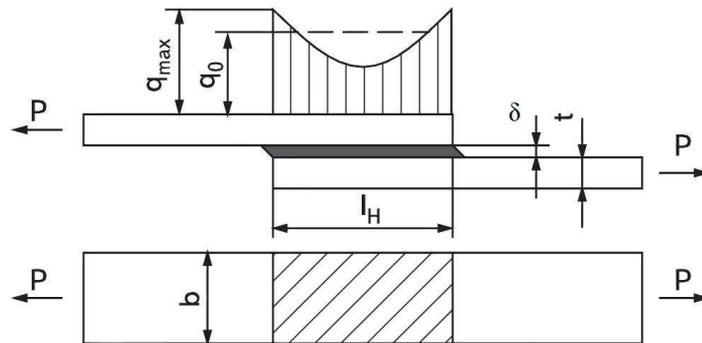


Рисунок 1 – Паяное соединение внахлестку, нагруженное осевыми силами

Чем меньше отношение G/E , где G — модуль сдвига паяного шва, а E — модуль упругости основного металла, тем меньше коэффициент концентрации и тем более вероятно выравнивание q_0 при малых деформациях.

Существенное значение для анализа напряженного состояния имеет способ закрепления компонентов, условия приложения и направление действия внешних сил с учетом внутренних напряжений. Для обеспечения надлежащих условий формирования паяного соединения на плате со стороны технологии необходимо использование эффективного флюса, обеспечение оптимальных технологических зазоров, выполнение установленных режимов пайки, а также дозирование припоя, обеспечивающее образование плавных галтелей с гладкой безусадочной поверхностью.

Так же к одним из самых главных причин разрушения паяного соединения необходимо отнести фактор старения оловянно-свинцовых припоев.

Структура зерна припоя, как правило, нестабильна во времени. Со временем зерно растет, поскольку это уменьшает внутреннюю энергию кристаллической структуры. Этот процесс роста зерна ускоряется с увеличением температуры и при термоциклической нагрузке. Процесс роста зерна — провоцирует накапливающуюся усталость [2]. По мере роста зерна увеличиваются межкристаллитные прослойки, в которые вторгаются чуждые для кристаллов всевозможные загрязнения припоя и вакансии в виде пустот. Из-за этих диффузионных процессов укрупнения кристаллов прочность припоя падает.

После того, как образуется 25% вакантных микропустот, при соответствующих механических нагрузках происходит разрушение паяного соединения по границам зерен. Эти микропустоты превращаются в микротрещины, если их объем достигает 40%. Вакансии микропустот увеличиваются в объеме, микротрещины растут и соединяются в макротрещины, ведущие к полному разрушению паяного соединения (см. рис. 2).

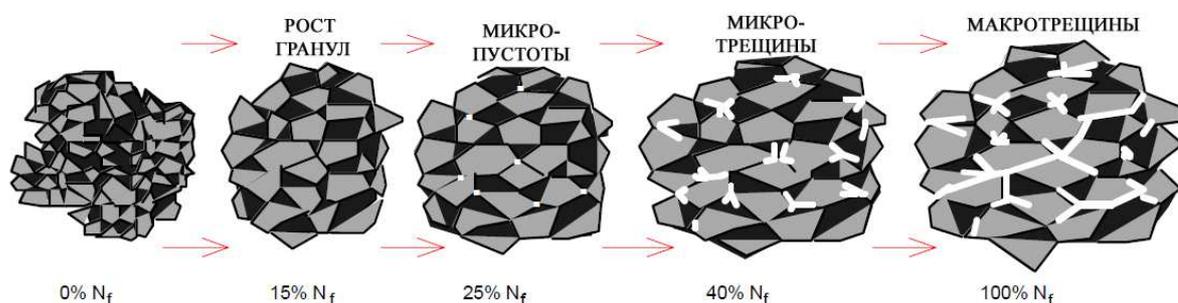


Рисунок 2 – Описание эффектов накапливающихся дефектов усталости в структуре паяного соединения;

С. Басаран и С. Ян открыли функцию развития дефектов [5] с помощью термодинамической теории. Их уравнение дефектов прогнозирует жизненную усталость припоя.

$$D = 1 - e^{-(\Delta e - \Delta \phi / N_0 k T / m_s)},$$

$$\Delta e - \Delta \phi = \frac{1}{\rho} \left(\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p \right) - \int_{t_0}^t \frac{1}{\rho} \frac{\partial q_i}{\partial x_i} dt + \int_{t_0}^t \dot{\gamma} dt,$$

где D - монотонно возрастающая скалярная переменная дефектов в текущем состоянии, T – абсолютная температура, N_0 – постоянная Авогадро, k – постоянная Больцмана, m_s – средномолекулярное молярное число, ρ – удельный вес, σ_{ij} – тензор напряжений, $d\varepsilon_{ij}^p$ - приращение тензора пластической деформации, $\dot{\gamma}$ - распределенный внутренний уровень высокой температуры на единицу массы, q_i - тензор теплового потока.

Возрастающая зависимость напряжение-деформация, изменяемая дефектами, может быть получена из принципа эквивалентности напряжения

$$d\sigma_{ij} = (1 - D)C_{ijkl}d\varepsilon_{kl}^{el},$$

$d\sigma_{ij}$ - увеличение тензора напряжения; C_{ijkl} - базовая матрица эластичности; $d\varepsilon_{kl}^{el}$ - возрастающий тензор пластичной деформации.

Наиболее существенный вклад этой модели - то, что у нее есть только четыре материальных параметра. Эта модель способна к предсказанию широкого диапазона образцов деформации в монотонном, циклическом, и пластичных режимах. Учитывается зернистая структура паяного соединения и ее изменение в широком диапазоне.

Паяное соединение — сложная металлическая структура, надежность которой существенно зависит от загрязнений припоя, создающих расслоение паек и увеличение зернистости с образованием межкристаллических пустот, переходящих в трещины. Скорость наступления отказов прямо связана с количеством циклических нагрузок, вызывающих усталостные разрушения.

Список использованной литературы

1.Медведев А. Технологическое обеспечение надежности электронной аппаратуры/ Новостной и аналитический портал «Время электроники» <http://www.russianelectronics.ru/engineer-r/review/339/doc561.shtml>

2.Engelmaier W. Solder Joint Reliability, Accelerated Testing and Result Evaluation//Chapter in Solder Joint Reliability: Theory and Applications, John Lau — Editor, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.

3.Ларин В. П. Технология пайки. Методы исследования процессов пайки и паяных соединений: Учеб. пособие/ СПбГУАП. СПб., 2002. 42 с

4.Парфенов А. Введению в теорию прочности паяных соединений// Технологии в электронной промышленности, №2 2008 с 46-52

5.Basaran C. Damage-Mechanics-Based Constitutive Model for Solder Joints.// Basaran, C., Zhao, Y., Tang, H., Gomez, J./ ASME Journal of Electronic Packaging./ Vol /127, September 2005. ISSN: 1528-9044

THE FRACTURE INITIATION OF SOLDERED JOINTS AND ANALYSIS REASON ORIGIN DESTRUCTION

Lozovoj Igor Aleksandrovich , Turetsky Andrey Vladimirovich

Voronezh state technical university, Russia, Voronezh

e-mail: tav7@mail.ru

In this article performed survey a basic factor influence of destruction soldered joints, has bring mathematical form for preliminary analysis maximal mechanical stresses, described function for adjectives develop defect.

Key words: solder, strength, defect, behavior, intermetallid.