

Надежность бессвинцовых электронных узлов

Согласно немецкой промышленной норме DIN EN ISO 8402 надежность представляет собой «временной аспект качества». Математически надежность может быть выражена как вероятность сохранения функциональности в течение определенного срока. Одной из самых важных проблем при переходе на бессвинцовую технологию является надежность, то есть временные изменения качества бессвинцовых паяных соединений по сравнению с обычными свинецсодержащими паяными соединениями. В то время как для свинецсодержащих припоев имеется большой опыт и обширные данные исследований свойств соединений и электронных узлов в течение долгого срока эксплуатации, исследование бессвинцовых припоев находится на начальной стадии. В связи с этим пока не представляется возможным дать однозначную оценку их надежности. При рассмотрении лишь основного механизма старения паяных соединений, а именно усталости паяных соединений, вызванной термомеханическими нагрузками, необходим дифференцированный подход в зависимости от конкретной ситуации и конструкции. Тем не менее, результаты лабораторных исследований и первый практический опыт позволяют обнаружить определенные тенденции. До тех пор пока накопленный опыт по качеству и надежности бессвинцовых паяных соединений не будет достаточно статистически и аналитически подтвержден, практические применения, в которых надежность играет важную роль, как, например, медицинская техника, будут исключены из предписанных Европейским Союзом применений для перехода на бессвинцовую технологию.

Матиас Новотник,
Д. Т. Н.,
профессор Университета
г. Росток

mathias.nowotnick@uni-rostock.de

Андрей Новиков

andrej.novikov@uni-rostock.de

Введение

Для свойств паяных соединений во время эксплуатации особую роль играет их температура плавления, что может быть показано с помощью гомологической температуры. Под гомологической температурой понимается отношение температуры эксплуатации к температуре плавления припоя, выраженных в градусах Кельвина. Для металлов известна зависимость, согласно которой их прочность резко понижается при превышении гомологической температуры со значением 0,4. Это значение гомологической температуры соответствует также критической температуре рекристаллизации. В данной температурной области в конструкциях, в которых возникают механические напряжения, необходимо учитывать сопротивление ползучести. Эта зависимость представлена на рис. 1.

При комнатной температуре мягкие припои имеют гомологическую температуру эксплуатации больше, чем 0,6. Из этого следует, что паяные соединения из мягких припоев испытывают пластическую деформацию при механическом воздействии. Более высокая температура плавления бессвинцовых припоев ведет к более низкой гомологической температуре, что в свою очередь приводит к более высокой усталостной прочности. Для надежности паяных соединений высокотемпературной электроники это большое преимущество. Правда, более прочное паяное

соединение автоматически не гарантирует повышения надежности всего электронного узла при соответствующей температуре эксплуатации. За счет меньшей скорости ползучести паяных соединений увеличиваются механические напряжения, вызванные перепадами температуры, которые переносятся на компоненты и структуры печатной платы при длительном сроке воздействия. В результате подобная нагрузка вызывает расслоение и растрескивание материала печатной платы.

Термомеханические свойства

В работах А. Шуберта [3], проведенных в институте прикладных исследований надежности и микроинтеграции им. Фраунгофера (Fraunhofer IZM), были исследованы основные механизмы ползучести для свинецсодержащих и бессвинцовых припоев. На рис. 2 представлены результаты этих исследований на примере стационарной ползучести при комнатной температуре для припоев SnPbAg, SnAg и SnAgCu.

Из графика видно, как отличаются зависимости скорости ползучести от механического напряжения для рассмотренных припоев. Если при небольших напряжениях (<15 МПа) скорость ползучести бессвинцовых припоев меньше, чем свинецсодержащего SnPbAg, то при более высоких напряжениях наблюдается обратная картина. При этом встает вопрос

о величине механических напряжений, возникающих в конкретном электронном узле и компонентах, и о том, какой припой (свинецсодержащий или бессвинцовый) обладает лучшими свойствами для данного случая. Поскольку механические напряжения появляются в основном из-за различий в тепловом расширении материалов, эти напряжения повышаются при увеличении размеров граний компонентов. Согласно следующему уравнению деформация паяных соединений возрастает при увеличении граний компонентов (l), разницы температуры (ΔT) и разницы температурных коэффициентов линейного расширения ($\Delta \alpha$) и уменьшается при увеличении зазора паяного соединения (высоты паяного соединения).

$$E = (l \times \Delta T \times \Delta \alpha) / h .$$

В связи с этим крупные компоненты с соответствующими большими различиями в расширении более критичны при использовании бессвинцовых припоев. Небольшие компоненты с небольшими различиями в расширении, напротив, могут быть более надежно смонтированы бессвинцовыми припоями, чем свинецсодержащими.

При рассмотрении реальных условий в паяном соединении следует также учитывать, что механические напряжения, возникающие при изменении температуры, действуют лишь короткое время, так как они уменьшаются непосредственно за счет деформации. При изменении температуры механическое напряжение проходит через все значения — от максимального до нулевого. При очень медленных сменах температуры уменьшаются максимально возможные значения напряжений, поскольку во время изменения происходит уменьшение напряжения вследствие ползучести. Вот почему быстрое изменение температуры, которое часто применяется для ускоренного старения и испытания электронных узлов, не всегда соответствует реальной нагрузке во время эксплуатации. За счет быстрой смены температуры могут быть превышены максимальные значения напряжений, что ведет к слишком критической оценке, особенно для бессвинцовых припоев.

Положительным аспектом подобного рассмотрения при вышеописанном влиянии напряжений является, как правило, более критическая оценка бессвинцовых припоев, чем свинецсодержащих. Так как сегодня день еще не существует предписанных стратегий для тестирования бессвинцовых электронных узлов, на практике применяются уже существующие методы тестирования без учета корреляции с реальным сроком службы. Это означает, что имеется достаточно большая вероятность того, что бессвинцовый электронный узел не пройдет тест, хотя он и соответствовал бы данным условиям эксплуатации. Хотя подобная ошибка менее опасна, чем если бы прошедший тестирование электронный узел отказал бы во время эксплуатации. В целом это может вести к тому, что бессвин-

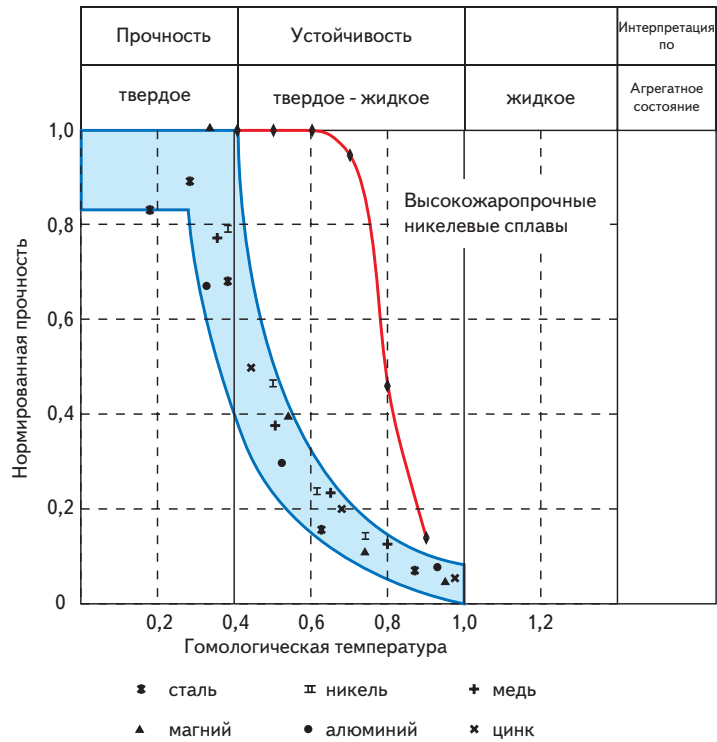


Рис. 1. Влияние гомологической температуры на прочность различных металлов [6]

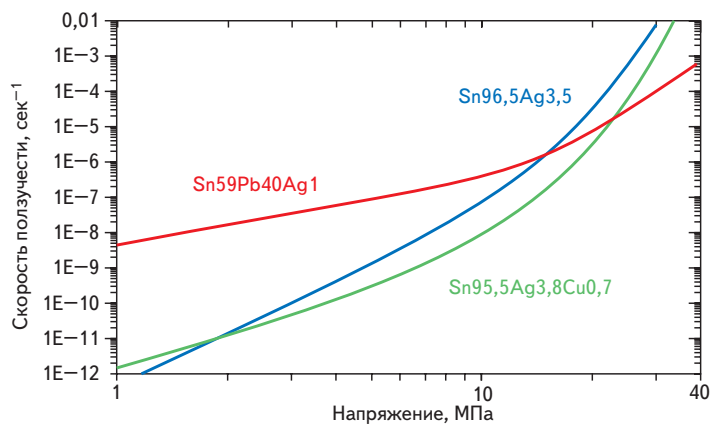


Рис. 2. Стационарная ползучесть при комнатной температуре для припоев SnPbAg, SnAg и SnAgCu [3]

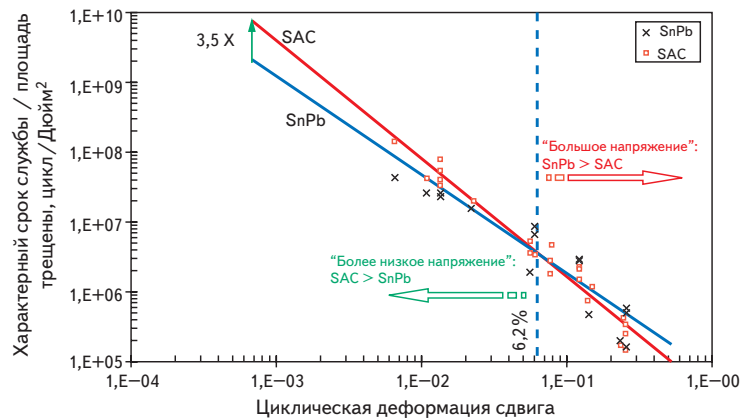


Рис. 3. Корреляция срока службы паяных соединений при циклическом растяжении [4]

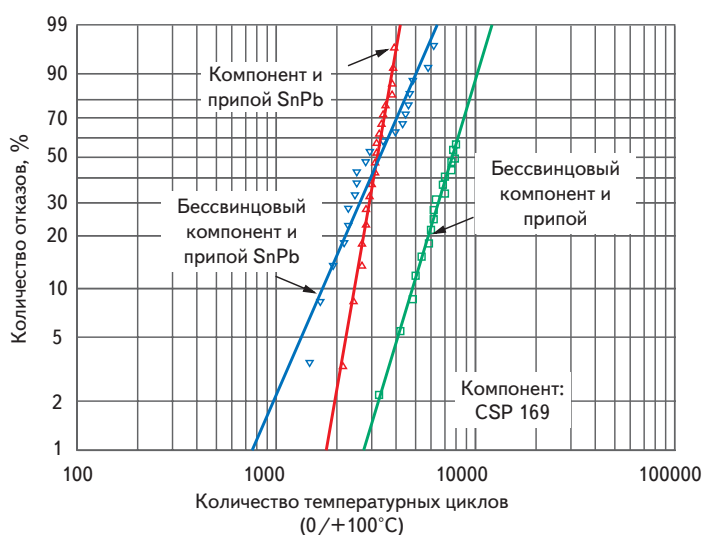


Рис. 4. Диаграмма Вейбулла монтированного компонента CSP169 с бессвинцовыми, свинецсодержащими и смешанными паяными соединениями после температурных циклов 0/100 °C

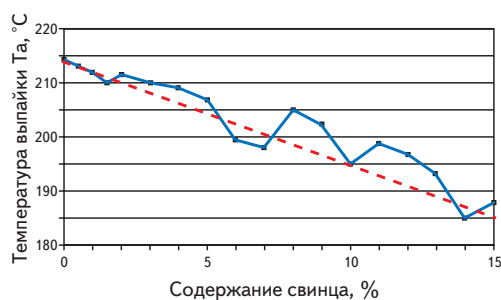


Рис. 5. Влияние содержания свинца в паяных соединениях SnAgCu на их температуру выпайки

цовые электронные узлы и/или отдельные компоненты не пройдут тестирование при таких параметрах, которые при реальной эксплуатации не вели бы к отказу.

Критические формы компонентов

Зависимость надежности от размера компонентов была исследована в работе Й.-П. Клеха [4]. В ней было показано, что образование трещин в свинецсодержащих и бессвинцовых паяных соединениях коррелирует с циклическим растяжением. Эта зависимость представлена на рис. 3. Было определено граничное значение растяжения, равное 6,2%. При меньших деформациях лучшие значения надежности имеют припой SnAgCu, при больших деформациях — традиционный припой SnPb.

Первые результаты практического применения бессвинцовых электронных узлов подтверждают данную зависимость. При монтаже миниатюрных компонентов бессвинцовыми припоями может быть достигнута большая надежность, особенно для высокотемпературных применений. Для более крупных компонентов, начиная примерно с формы 1206 с длиной грани 3,1 мм, тенденция меняется на противоположную. Важную роль при этом, конечно, играют и другие факторы, например, комбинация паяльного материала и металлизации компонентов.

Проблема надежности больших компонентов с длинными гранями и небольшим коэффициентом расширения только усиливается при использовании бессвинцовых припоев. При проектировании новых бессвинцовых электронных узлов рекомендуется применять компоненты с наименьшими размерами, например 0402 или даже 0201. В активных компонентах данная проблема смягчается для корпусов с выводными контактами QFP и SO, поскольку часть деформации между компонентом и печатной платой может быть поглощена эластичными выводами в форме крыла чайки (Gull-Wing). Для безвыводных кристаллодержателей (LCC) применение бессвинцовых припоев наиболее невыгодно с точки зрения надежности.

Компоненты с выводами в форме матрицы, в том числе BGA и прочие, — это особый случай, так как их шариковые контакты составляют большую часть паяного соединения. В зависимости от применяемого сплава шариковые контакты могут быть расплавлены при пайке, что влияет в свою очередь на величину зазора между компонентом и печатной платой (см. формулу ранее). В большинстве случаев коэффициенты расширения платы, носителя компонента, и материала печатной платы согласованы между собой, так что $\Delta\alpha$ получается сравнительно небольшим и проявляет свое действие, скорее, между при-

поем и материалом печатной платы. Значительно рискованнее коробление и изгиб печатных плат, так как они вызывают дополнительные напряжения среза и напряжения при растяжении в паяных соединениях, что в свою очередь увеличивает трещины и скорость их распространения в соединениях.

Смешанная технология со свинцом/без свинца

Именно в фазе перехода на бессвинцовые технологии необходимо учитывать, что свинецсодержащие контакты компонентов часто используются вместе с бессвинцовыми припоями или наоборот. Компоненты со свинецсодержащим покрытием могут быть, как правило, применены только для типичных параметров процесса пайки свинецсодержащими припоями. Таким образом, более высокие температуры процесса бессвинцовой пайки могут вести к повреждению этих компонентов. Особенно при волновой и селективной пайке нередко достигаются температуры выше 260 °C, что значительно превышает допустимые пределы для многих компонентов. С одной стороны, могут размягчиться и за счет этого деформироваться детали из пластмассы, такие как, например, разъемы, переключатели, каркасы катушек индуктивности. С другой стороны, влага, находящаяся в пластиковых корпусах интегральных схем, может вести при нагреве к нежелательному «попкорн-эффекту». При этом пластиковый корпус раздувается, может потрескаться и даже полностью разрушиться.

При комбинации свинецсодержащего покрытия компонентов и бессвинцовых припоев можно исходить из того, что данное покрытие почти полностью растворится в припое. В действующих в Европейском Союзе законодательных актах существует, однако, принципиальная проблема. Предписанные предельные значения допускают содержание свинца в «однородном» материале не более чем 0,1%. Для надежности же большее значение имеет тот факт, что в некоторых случаях подобные комбинации вели к заметному снижению прочности после температурных циклов. На рис. 4 типичная диаграмма Вейбулла показывает, что количество возможных температурных циклов для компонента CSP значительно увеличивается при переходе на бессвинцовые припои. Количество циклов при комбинации бессвинцовых шариков припоя компонента со свинецсодержащим припоем даже уменьшается по сравнению с традиционной свинецсодержащей технологией.

До сих пор не существует точных данных, какая процентная часть свинца в припое при каких условиях может привести к проблемам. На простом примере может быть проведена оценка содержания свинца в паяном соединении. Покрытие компонента толщиной всего 0,1 мкм может привести к нарушению предписанного законом допустимого содержания свинца 0,1%. На практике обычно используются покрытия толщиной 1–2 мкм, так что

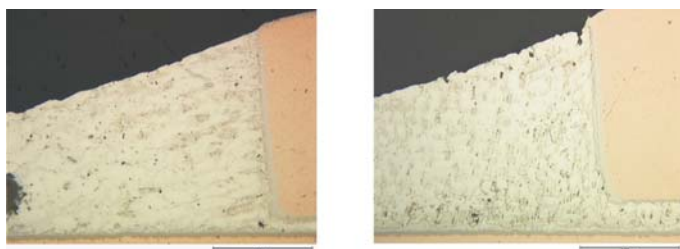


Рис. 6. Соединение компонента SO с бессвинцовыми контактами паяное оплавлением паяльной пасты SnAg3,0Cu0,5 в исходном состоянии (слева) и после 1000 температурных циклов $-55/+125$ °C (справа) [1]

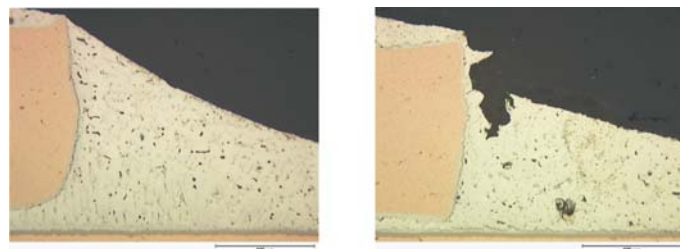


Рис. 7. Соединение компонента SO со свинецсодержащими контактами паяное оплавлением паяльной пасты SnAg3,0Cu0,5 в исходном состоянии (слева) и после 1000 температурных циклов $-55/+125$ °C (справа) [1]

содержание свинца в паяном соединении может достигать 2,5%. Измерение температуры выпайки является одной из возможностей обнаружить слабые места в паяных соединениях. При данном измерении паяное соединение подвергается небольшой нагрузке (0,1 МПа) и медленно нагревается до тех пор, пока не разрушится [2]. С помощью этого метода было проведено систематическое исследование температуры выпайки в зависимости от содержания свинца в паяных соединениях SnAgCu. На рис. 5 показаны результаты данного исследования. Даже небольшого количества свинца (меньше чем 1%) явно достаточно, чтобы заметно снизить температуру выпайки. Исследования проводились до максимального значения содержания свинца 15%, при этом была практически достигнута температура плавления эвтектического припоя SnPb (183 °C).

Связь с возможными механизмами повреждения, а следовательно, и с надежностью паяных соединений была выявлена в практическом исследовании [1]. В электронных узлах из промышленного производства была использована комбинация компонентов с бессвинцовым и свинецсодержащим покрытиями — как с бессвинцовым процессом пайки оплавлением с применением различных припоев SnAgCu, так и с бессвинцовым процессом волновой пайки с применением припоев SnCu и SnCuNi. Данные электронные узлы с различными видами монтажа испытывались в температурной камере с быстрыми сменами температуры ($-55/+125$ °C) до 1000 циклов. Во время этих циклов не было зафиксировано значительных отказов, в том числе и в случае смешанной технологии со свинецсодержащими компонентами и бессвинцовыми припоями. При измерении прочности на срез после температурных циклов также не было выявлено значительных различий между компонентами со свинецсодержащими и бессвинцовыми покрытиями. Этот факт должен успокоить всех тех, кто и в дальнейшем будет вынужден применять в производстве электронных узлов свинецсодержащие компоненты в каком-либо количестве. Более внимательное рассмотрение поперечных разрезов паяных соединений и сравнение различных вариантов все же показывают необходимость быть начеку при использовании смешанной технологии.

На рис. 6 и 7 показаны в сравнении свинецсодержащие и бессвинцовые контакты

на примере смонтированного компонента SO в исходном состоянии и после 1000 температурных циклов. В то время как в полностью бессвинцовом варианте (рис. 6) даже после 1000 циклов практически не видно трещин, в свинецсодержащем контакте компонента (рис. 7) видны уже значительные изменения и первые трещины. Их размер хотя пока и не является критическим для данного паяного соединения, но позволяет дифференцировать процессы старения в паяных соединениях со свинецсодержащими и бессвинцовыми покрытиями компонентов.

Заключение

Результаты проведенных исследований надежности бессвинцовых паяных соединений показали комплексность этой проблемы. Отдельное рассмотрение термомеханических свойств только паяльного материала является недостаточным, поскольку всегда необходимо учитывать взаимодействия во всей системе соединения. Экспериментальное определение надежности посредством типичных сегодня ускоренных старений, как, например, быстрые температурные циклы, может быть перенесено на бессвинцовые электронные узлы лишь с определенными ограничениями. С помощью эмпирически полученных за много лет использования свинецсодержащих припоев взаимосвязей стало возможным провести сравнение с данными из процесса эксплуатации и вычислить соответствующие факторы ускорения. Подобные сведения, к сожалению, отсутствуют для бессвинцовых применений, так как на настоящий момент необходимые для этого эксплуатационные данные недостаточны и не могут быть получены за столь короткий срок.

Для проектирования надежных бессвинцовых электронных узлов необходимо избегать использования не только больших и жестких компонентов, но и быстрых смен температуры, поскольку они опаснее, чем просто высокие температуры. В связи с тем, что условия окружающей среды, как правило, не могут быть изменены, проблема надежности может быть решена лишь правильным выбором размеров электронного узла и технологий монтажа. Так, критические компоненты могут быть смонтированы на больших заземленных площадях или снабжены теплоотводом (heat spreader), которые замедляют возникновение механических напряжений при изменении

температуры. Для компонентов BGA рекомендуется симметричный монтаж, то есть на верхней и нижней стороне печатной платы. Таким образом может быть компенсировано критическое коробление.

Необходимо согласование современных стратегий тестирования и лежащих в их основе моделей, которое, правда, требует достаточно большого объема практических данных о сроках эксплуатации. Для испытания температурными циклами может быть, например, необходимо увеличить время выдержки. Рационально также использование несимметричных циклов с целью экономии времени, а именно увеличение периода выдержки при низкой температуре (медленная ползучесть) и сокращение времени выдержки при высокой температуре (быстрая ползучесть). Вероятно, продолжительность цикла должна быть значительно увеличена по сравнению с сегодняшними стандартами.

Литература

1. Pape U., Novikov A., Werkmeister W. Sartorius Electronics — Untersuchungsbericht IZM — 2005-349; Untersuchung der Zuverlässigkeit von bleifreien Baugruppen nach Reflow- und Wellenloten.
2. Kising M., Wittke K., Scheel W., Nowottnick M. Verfahren zur Ermittlung mechanischer und/oder rheologischer Eigenschaften eines Prüfkörpers; DE 19644094C2; 31.10.1996.
3. Schubert A., Dudek R., Doring R., Walter H., Auerswald E., Gollhardt A., Schuch B., Sitzmann H., Michel B. Lead-free solder interconnects: characterization, testing and reliability. Proceedings, 3rd International Conference on Benefiting from Thermal and Mechanical Simulation in Microelectronics, EuroSIME 2002, Paris, France, April 15-17, 2002.
4. Clech J. P. Lead-Free and Mixed Assembly Solder Joint Reliability Trends. APEX SMTA Council Designer Summit. 2004.
5. Lau J. C., Wong C. P., Ning-Cheng Lee, Ricky S.W. Lee. Challenges for lead-free Soldering Voiding. Electronics Manufacturing with lead-free, halogen-free & conductive adhesive materials. 2003.
6. Wittke K., Fussel U. Kombinierte Fügeverbindungen; Springer Verlag, Berlin. 1996.
7. Handwerker C., u.a. NEMI lead-free assembly project — Comparison between PbSn and SnAgCu reliability and microstructures; SMTA — Chicago. 2003.