

Повышение надежности за счет миниатюризации?

Частичные результаты проекта LiVe (Limitierte Verbindungen – лимитированные соединения).

Часть 4. Формулирование моделей срока службы на основе экспериментальных и расчетных данных

Уве Папе (Uwe Pape)

Uwe.Pape@volkswagen.de

Райнер Дудек (Rainer Dudek)
Румен Рачев (Roumen Ratchev)

Перевод: Андрей Новиков

andrej.novikov@uni-rostock.de

Краткое описание

Представленная статья содержит выборочные результаты из проекта «Модификация материала для конструкций соединений с ограничением размеров и материала в электронных модулях с высокой степенью интеграции», финансируемого Министерством образования и науки (BMBF — Bundesministerium für Bildung und Forschung). Сокращенное название проекта — LiVe (Limitierte Verbindungen — лимитированные соединения). В основном в данной статье приведены материалы докладов (в сжатой форме), которые были прочитаны на консультационном семинаре в рамках выставки SMT/Hybrid & Packaging 2008. Доклады разделены в соответствии с четырьмя основными задачами проекта:

- Часть 1. Постановка цели и методы решения.
- Часть 2. Результаты исследований с различными методами измерений.
- Часть 3. Металлургические взаимодействия и их проявления.

• Часть 4. Прогнозирование долговечности на основании результатов экспериментов и моделирования. Здесь приводится первая часть, в которой описаны постановка цели и результируемая матрица решений в проекте LiVe, а также методика обработки результатов проекта. Особенно это касается исследования припоев и паяных соединений, вариации методов тестирования и выбора тестовых модулей.

Сравнение результатов экспериментов с расчетными данными

Расчет термомеханической нагрузки в паяных соединениях может быть сделан либо аналитически, либо с помощью численного моделирования. При этом аналитический расчет может быть применен лишь в некоторых упрощенных случаях. В качестве универсального инструмента для числового определения подобных нагрузок может быть использован метод конечных элементов, который позволяет проводить вычисления для сложных геометрических форм и сложных нелинейных характеристик материалов.

Подробно рассмотренная в данном проекте и характерная для многих применений усталостная температурная нагрузка в большинстве случаев ведет к повреждению паяных соединений и в связи с этим может быть оценена с помощью таких величин, как пластическая деформация (ползучесть) или рассеянная энергия.

Основное условие для этого — знание характеристик ползучести соответствующего припоя, которые, особенно в случае бессвинцовых припоев на основе олова, зависят от многих факторов: микроструктуры, составляющих сплава и интерметаллических фаз. Для описания ползучести припоя с помощью модели, близкой к реальности, использовались определенные законы ползучести для проведения в данном проекте анализа паяных соединений с помощью метода конечных элементов (рис. 1).

Моделирование температурной усталости компонентов на тестовых печатных платах было проведено как для безвыводных компонентов, так и для компонентов с шариковыми контактами. На рис. 2 пред-

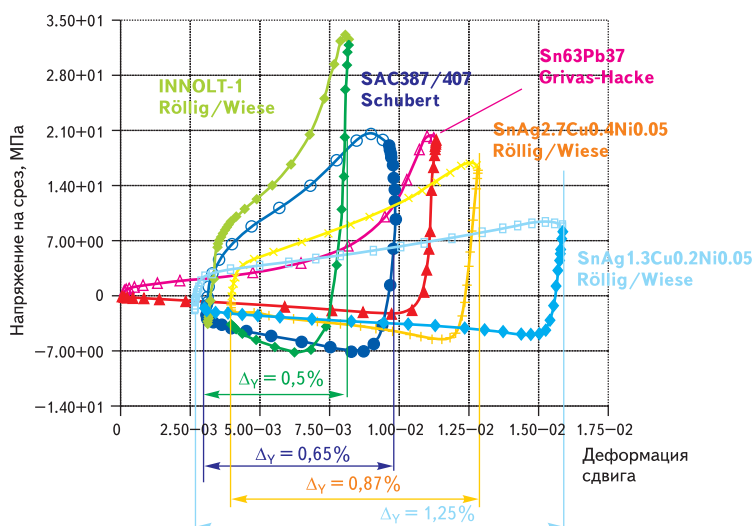
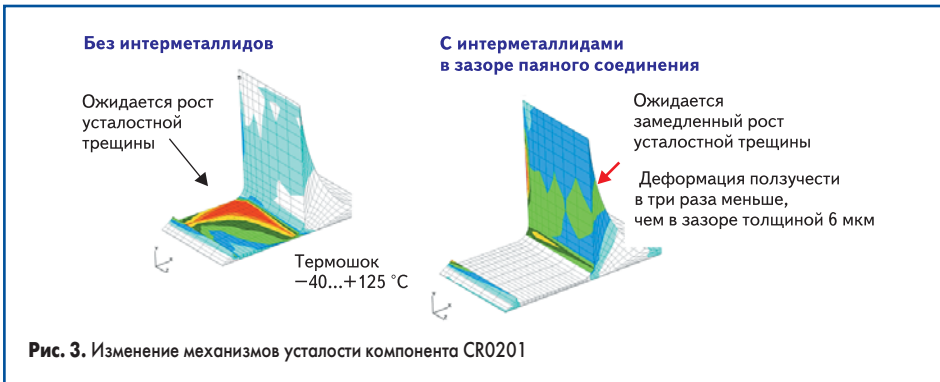
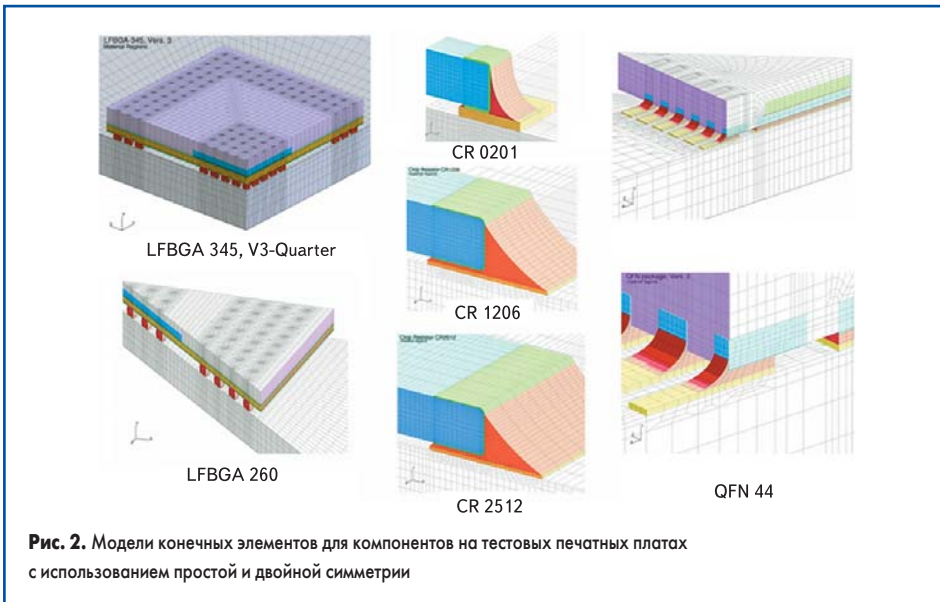


Рис. 1. Кривые гистерезиса первой и второй ступеней для ползучести SAC-припоев



ставлены смоделированные в данном проекте модули. Также были исследованы эффекты второго порядка при нагрузке, например, температурные анизотропные характеристики материала FR-4, в том числе в плоскости печатной платы, изгиб печатной платы без внешней нагрузки и интерметаллические фазы на границе с контактными площадками. Учет последних эффектов особенно важен по причине ожидаемой в ближайшем будущем высокой степени миниатюризации и, как следствия, качественно нового соотношения между объемом и поверхностью соединения, что соответствует целям данного проекта.

В проекте LiVe для оценки и сравнения испытания проводились при различных условиях нагрузки, как для практического тестирования, так и для моделирования. При представлении результатов приводится ссылка на условия тестирования и количество циклов нагрузки термошоком, а также на количество циклов реальной нагрузки.

Относительно граничных интерметаллических фаз компонентов формы 0201 было установлено, что состав материала в зазоре паяного соединения, уменьшенного до толщины примерно в 6–7 мкм, определяется в значительной степени интерметаллическими фазами, которые частично перекрывают зазор соединения. В любом случае необходимо исходить из того, что материал в зазоре больше не обладает свойствами, характерными для припоя. В связи с этим фактом в модели конечных элементов свойствам материала в зазоре паяного

соединения были присвоены свойства интерметаллической фазы.

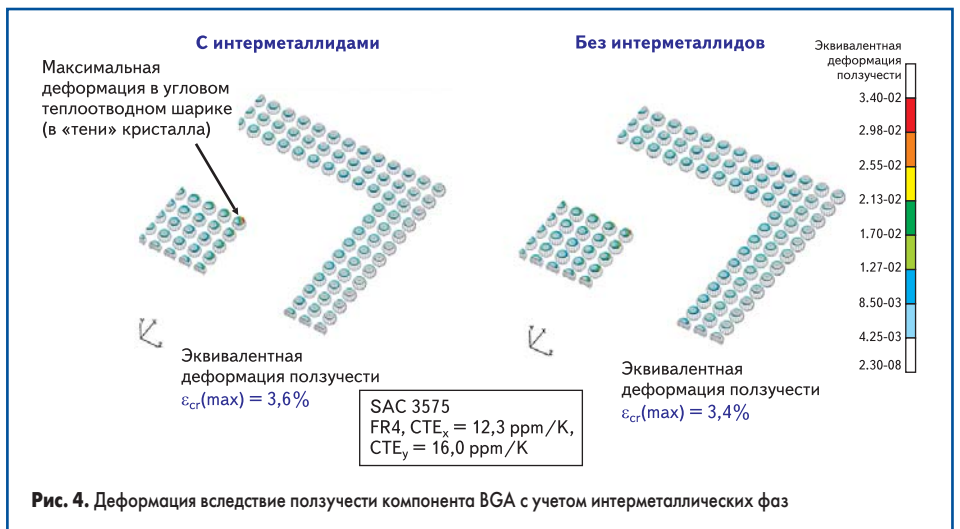
С помощью расчетов было установлено очень сильное влияние на характеристики миниатюрных компонентов при нагрузке, что означает, что основные эффекты образования интерметаллических фаз в приграничных областях, которые влияют на характеристики надежности при нагрузке термоциклированием, могут быть зафиксированы при толщине зазора паяного соединения, примерно равного толщине граничных интерметаллических фаз (рис. 3).

Для анализа методом конечных элементов были выбраны компоненты в корпусах LPGA 260

и LFBGA 345. Для построения 1/8 модели компонента LPGA 260 необходима симметричность в плоскости печатной платы, для 1/4 модели LFBGA 345 допустима несимметричность в плоскости печатной платы. Для тестовой платы была установлена несимметричность со значением 3,5 ppm/K, что составляет примерно 20% от 12,3 ppm/K и 16 ppm/K. В моделировании учитывалось влияние образования интерметаллических фаз на процессы в ходе нагрузки шарика припоя. Для модели использовалось значение толщины слоя ИМФ, измеренное в поперечном срезе паяного соединения с наибольшей нагрузкой. Так как в ходе моделирования наибольшая нагрузка была зафиксирована в крайнем угловом теплоотводном шарике (расположение в «тени кристалла»), там также было учтено наличие интерметаллических фаз.

Независимо от формы корпуса компонента во всех шариковых контактах максимальная нагрузка была установлена на границе «шарик припоя – контактная площадка компонента» в соответствующей граничной области контакта. Нагрузка компонента LFBGA 345 выше нагрузки в компоненте формы LPGA 260. Нагрузка примерно одинаково распределена по матрице контактов, однако концентрация нагрузки была установлена на внешних рядах теплоотводных шариков, а также в следующем ряду периферийных шариков. Для компонента LFBGA 345 суммарная максимальная нагрузка зафиксирована на внешнем ряду теплоотводных шариков с абсолютным максимальным значением в угловом шарике. Для компонента LFBGA 345 данная нагрузка, измеряемая в эквивалентной усталостной деформации за каждый цикл, выше, чем для компонента LFBGA 260. Она увеличивается от максимального значения в 2,2% до значения 3,9% за цикл.

Для компонентов формы BGA при термоциклической нагрузке интерметаллические фазы на металлизации оказывают незначительное влияние на нагрузку в объеме паяного соединения с концентрацией в граничных областях (рис. 4). Причиной незначительного влияния может быть большой зазор соединения по сравнению с толщиной слоев. Разъединяющие свойства слоев между кристаллом и шариками припоя, как, например, паяльная



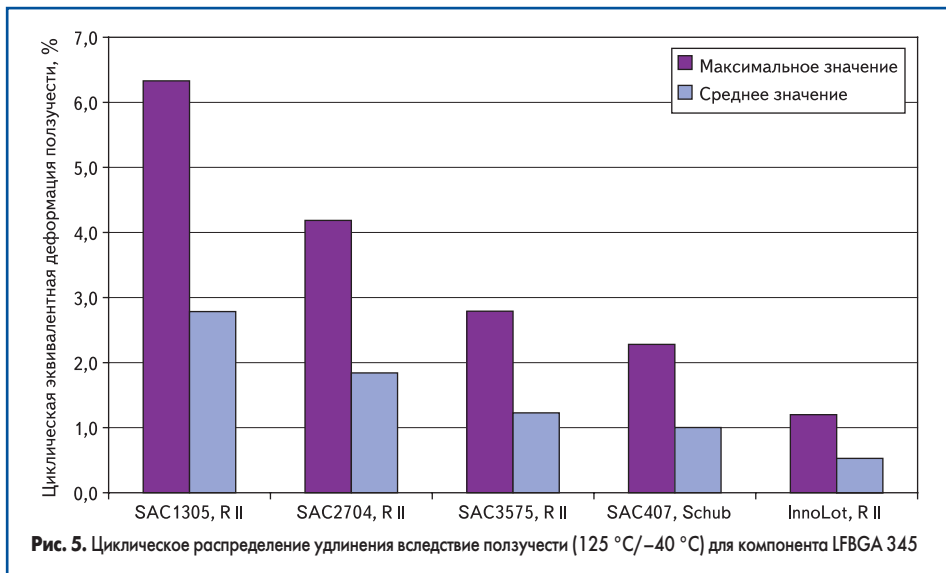


Рис. 5. Циклическое распределение удлинения вследствие ползучести (125 °С/–40 °С) для компонента LFBGA 345

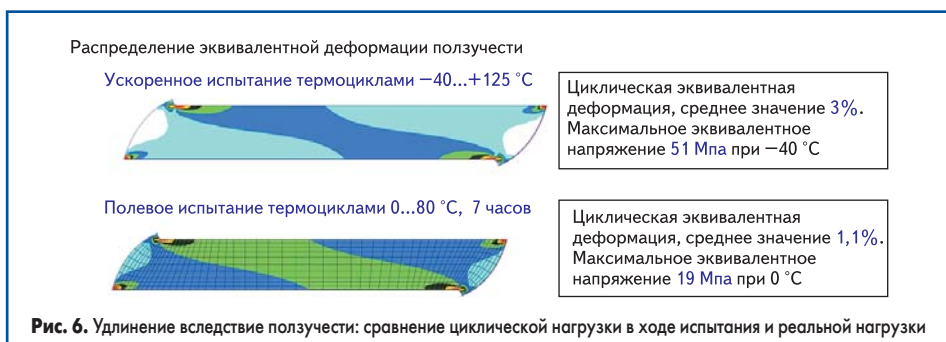


Рис. 6. Удлинение вследствие ползучести: сравнение циклической нагрузки в ходе испытания и реальной нагрузки

маска на субстрате, играют бóльшую роль, чем свойства фаз и припоев.

Для анализа методом конечных элементов компонентов с матричным расположением выводов был проведен ряд исследований различных зависимостей. На рис. 5 представлены вычисленные значения циклических удлинений вследствие ползучести в зависимости от выбранного сплава припоя. Хорошо видно увеличение усталостной деформации при уменьшении содержания серебра.

Независимо от сплава припоя и типа корпуса максимальная нагрузка была зафиксирована для всех контактов на границе интерметаллической фазы шарика припоя и контактной площадки субстрата. Также было выявлено, что в компоненте LFBGA 345 суммарная максимальная нагрузка происходит на внешних рядах теплопроводных шариков припоя с абсолютным максимальным значением в угловом теплопроводном шарике независимо от сплава припоя. Рассчитанные значения циклической усталостной деформации имеют сильную зависимость от припоя SnAgCuXX или InnoLot. Сравнение результатов испытаний показало хорошую согласованность между результатами моделирования и характеристиками повреждения.

Относительно реальной нагрузки была определена характерная нагрузка при эксплуатации, для которой были проведены сравнительные вычисления. Было проведено сравнение результатов вычислений с результатами испытаний и установлено, что прогнозирование срока эксплуатации с использованием модели в отдельном случае является надежным (рис. 6).

Прогнозирование срока эксплуатации бессвинцовых паяных соединений с учетом реальной нагрузки

Требования к надежности электронных компонентов в автомобиле постоянно возрастают. С одной стороны, значительно ужесточаются условия эксплуатации приборов управления автомобилем, например вследствие монтажа этих приборов непосредственно на моторе или в коробке передач. С другой стороны, возрастают требования к сроку эксплуатации автомобиля при постоянно увеличивающемся количестве используемых электронных компонентов. При использовании стандартных технологий без изменений это ведет к сокращению коэффициентов надежности, которые закладываются при разработке, конструировании и испыта-

нии электронных приборов управления. Существует опасность, что вследствие механизмов отказов, связанных с износом, не может быть достигнут требуемый срок службы. Особенно это касается срока службы паяных соединений, которые с точки зрения надежности относятся к наиболее критичным элементам электронного модуля.

Для обеспечения надежной эксплуатации электронных приборов в автомобиле, в связи с ужесточением внешних условий, для технического обоснования в ходе разработки электронного модуля необходимо:

- знание релевантных механизмов отказов для используемых материалов и технологий;
- знание уровня нагрузки, которая происходит при реальной эксплуатации.

Особенно важно иметь в распоряжении модель для прогнозирования срока службы, которая позволяет провести пересчет между эксплуатационной нагрузкой паяных соединений и требованиями при испытаниях. Это имеет особое значение для оценки бессвинцовых паяных соединений, так как для них пока не накоплен достаточный опыт в условиях реальной эксплуатации (рис. 7).

В данной работе проведено сопоставление экспериментальных данных по сроку службы паяных соединений из проекта LiVe с моделью для прогнозирования срока эксплуатации.

Вычисленные подобным образом коэффициенты ускорения были проверены с помощью результатов испытаний с условиями, близкими к реальной нагрузке (рис. 8). Данное сравнение проводилось как для стандартного припоя олово-свинец, так и для бессвинцового припоя сплава SnAg4,0Cu0,5.

Аналитические модели, описывающие срок службы, предпочтительнее тем, что они достаточно просто и наглядно связывают основные факторы влияния для определенных корпусов, типичных для поверхностного монтажа, и тем самым позволяют сделать быстрый прогноз, а также частичный анализ чувствительности к отдельным факторам. Основные аналитические модели чаще всего базируются на уравнении Коффина-Мэнсона (КМ):

$$N_{f1}/N_{f2} = (\Delta T_2/\Delta T_1)^k \quad (1)$$

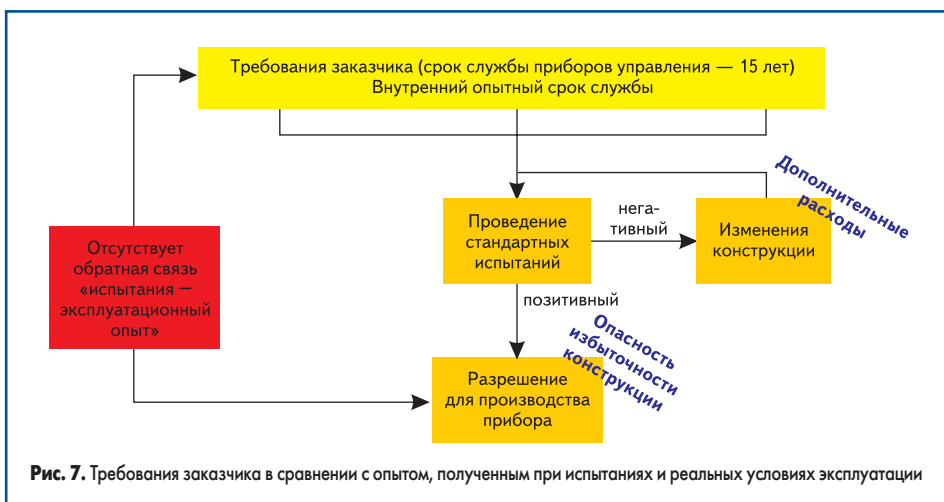
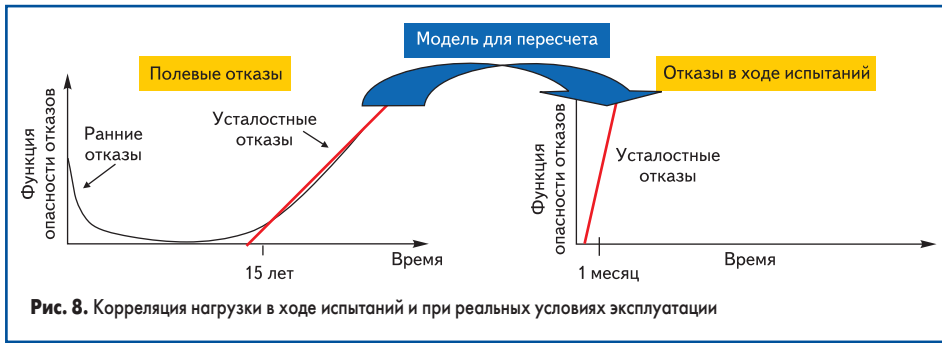


Рис. 7. Требования заказчика в сравнении с опытом, полученным при испытаниях и реальных условиях эксплуатации

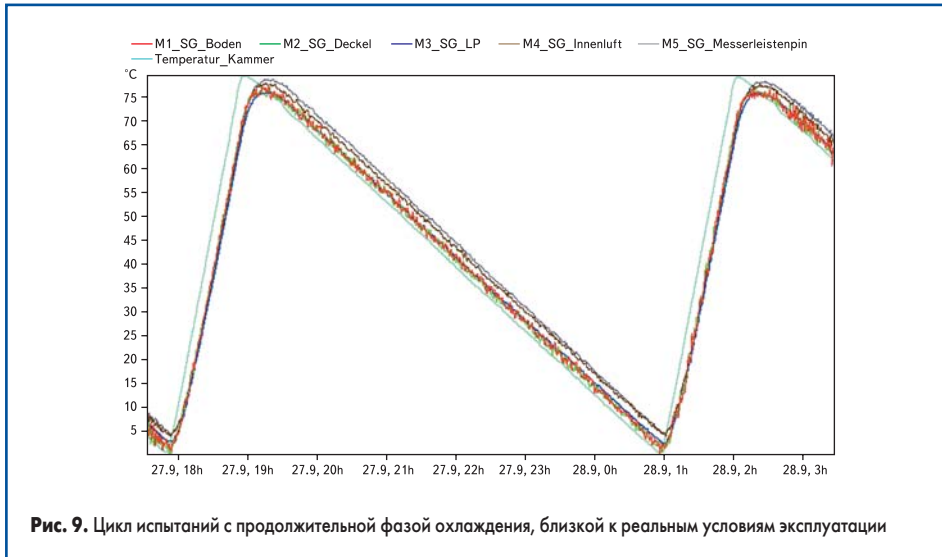


ний и как эти результаты в конечном итоге могут быть переведены в теоретические расчеты. Так, после первых 500 циклов, прежде всего, наблюдается рост макротрещин в зазоре паяных соединений, после чего он переходит в мениск или же наблюдается рост трещин со стороны поверхности мениска (рис. 10). Вывод из этих результатов: расчет N_{Test} целесообразен только при значении остаточной силы на срез в области от 20 до 80%.

В ходе дальнейшей обработки данного проекта эта область была сужена, и для окончательного определения срока службы было выбрано значение уменьшения силы на срез на 50%. С учетом накопленного опыта, что ни критерий отказа (место прохождения трещины), ни размер компонента не оказывают значительного влияния на модель КМ, составленное уравнение КМ было дополнено значениями срока службы из ускоренных испытаний. Были получены следующие коэффициенты:

- SnPb — 2,4;
- SAC405 — 5,1.

С помощью уравнения КМ можно сравнить друг с другом две разницы температур при термоциклировании при условии одинакового уровня повреждения. Это означает, что для точной и гарантированной оценки ускорения необходимо сравнение разницы температур в лабораторных и полевых испытаниях. При одинаковом уровне повреждения (остаточная сила на срез 60%) может быть



Прочие модели, позволяющие пересчет лабораторных и полевых испытаний, основываются на моделях:

- Норриса-Ланцберга:

$$\frac{N_{Feld}}{N_{Test}} = \left(\frac{\Delta T_{Test}}{\Delta T_{Feld}} \right)^{k_1} \times \left(\frac{t_{Test}}{t_{Feld}} \right)^{k_2} \times \exp \left[k_3 \left(\frac{1}{T_{Feld, max}} - \frac{1}{T_{Test, max}} \right) \right]; \quad (2)$$

- Энгельмайера:

$$\Delta \gamma = (l/h) \Delta \alpha \Delta T, \Delta \alpha = \alpha^S - \alpha^B, \Delta T = T^{max} - T^{min}. \quad (3)$$

В рамках проекта LiVe были проведены различные испытания с нагрузкой термоциклами. Разница температур изменялась при этом от 90 до 180 К. Время задержки при граничных значениях и время смены температур сохранялось постоянным. При разнице температур в 80 К время нагрева составляло 1 час, а время охлаждения — 6 часов (рис. 9).

Поведение старения паяных соединений в ходе этих экспериментов описывалось с помощью испытаний на срез. В то время как в ходе постоянной температурной нагрузки наблюдалось лишь незначительное уменьшение силы на срез вследствие старения, повреждение паяных соединений во время термоциклирования происходило очень быстро. На основе разнообразия испытанных образцов была построена схема, в каких местах повреждение происходит в первую очередь, каким образом должен проводиться анализ этих поврежде-

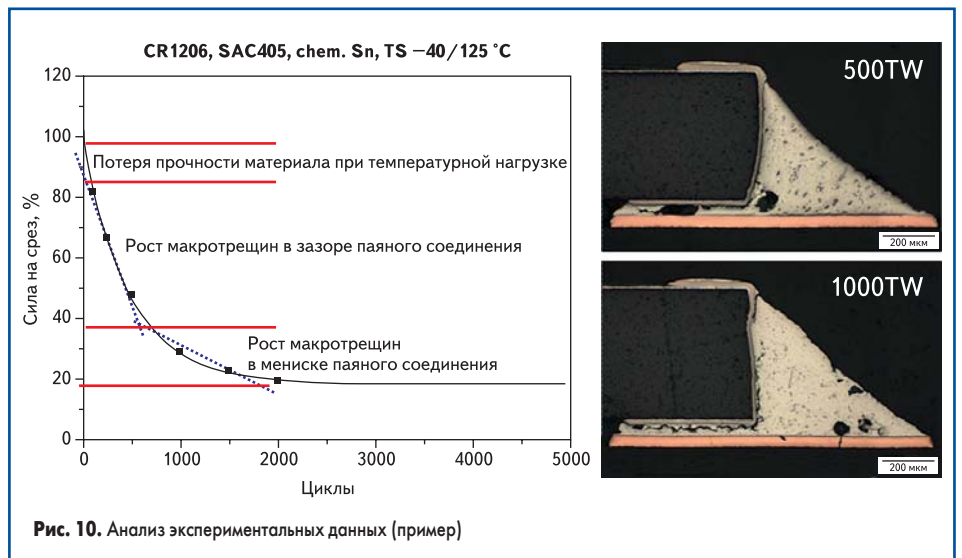


Рис. 10. Анализ экспериментальных данных (пример)

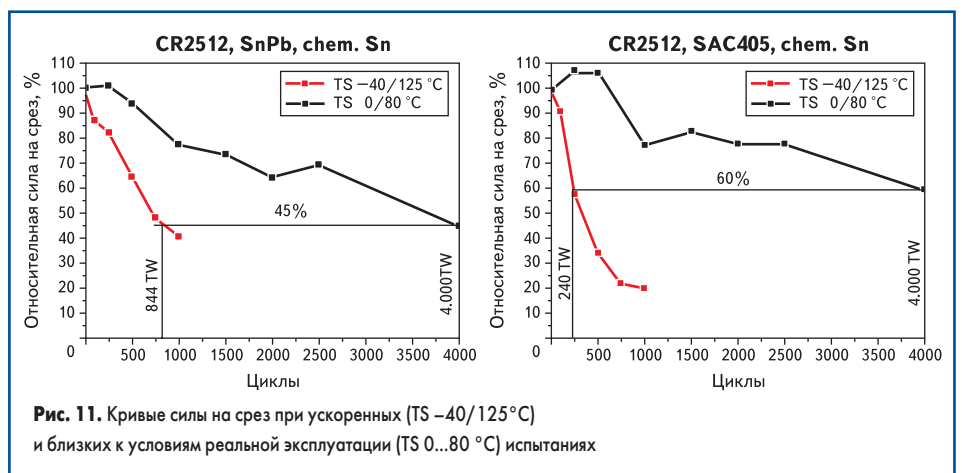


Рис. 11. Кривые силы на срез при ускоренных (TS -40/125 °C) и близких к условиям реальной эксплуатации (TS 0...80 °C) испытаниях



Рис. 12. Информация о коэффициенте КМ, полученная при анализе микроструктуры

определено соответствующее количество циклов для полевых и ускоренных лабораторных испытаний (рис. 11). С помощью этих данных были вычислены следующие значения коэффициентов Коффина-Мэнсона:

- SnPb — 2;
- SAC405 — 3,9.

Возможная причина различного количества циклов для бессвинцового припоя при выбранном значении остаточной силы на срез в 60% может заключаться в микроструктуре паяного соединения. С помощью снимков, полученных методом дифракции вторичных электронов (Electron Backscatter Diffraction, EBSD), было обнаружено образование зоны рекристаллизации размером около 25 мкм на одной из граней компонента после 4000 термоциклов с разницей температур, близкой к полевым условиям. При одинаковом уровне повреждения уже после 250 ускоренных циклов термошока образуется в 4 раза большая зона рекристаллизации (рис. 12).

Из различных испытаний и вычислений может быть выявлено влияние разницы температур в зависимости от испытываемого сплава припоя:

- при большой разнице температур:
1. InnoLot → 2. SnPb → 3. SAC,
- при маленькой разнице температур:
1. InnoLot → 2. SAC → 3. SnPb.

Большая разница в характеристике при ускорении между припоями SnPb и SAC405 ведет к следующим гипотезам:

- Механизм повреждения SAC-припоев изменяется при разнице температур, близкой к полевым условиям, и при ускоренной разнице температур. Это означает, что паяль-

ные материалы не могут быть испытаны при большой разнице температур ($\Delta T = 165^\circ\text{C}$).

- Механизм повреждения SAC-припоев не изменяется при разнице температур, близких к полевым условиям, и при ускоренной разнице температур. Это означает, что при разнице температур в лабораторных испытаниях ускорение повреждения SAC-припоев происходит значительно быстрее, чем в припое SnPb.

Выводы

Приведенные в данной статье результаты получены большей частью на тестовой печатной плате 1 из проекта LiVe. В связи с многообразием полученных данных авторы смогли представить в этой статье лишь небольшую часть результатов.

В финальном отчете, который опубликован в виде отдельной книги в конце 2008 года, содержатся подробные результаты данного проекта. Книга продолжает тематическую серию «Технологии монтажа и соединений в электронике — актуальные отчеты» и представляет собой 8-й том серии полных отчетов по различным проектам в области технологий монтажа и соединений (рис. 13).

Этот научно-исследовательский проект финансировался Министерством образования и науки Германии в рамках концепта «MaTech». Организационная поддержка оказывалась со стороны Исследовательского Центра Юлих (PTJ). Авторы всех четырех частей хотели бы от имени всего исследовательского консорциума выразить благодарность Министерству образования и науки Германии за оказанную поддержку.

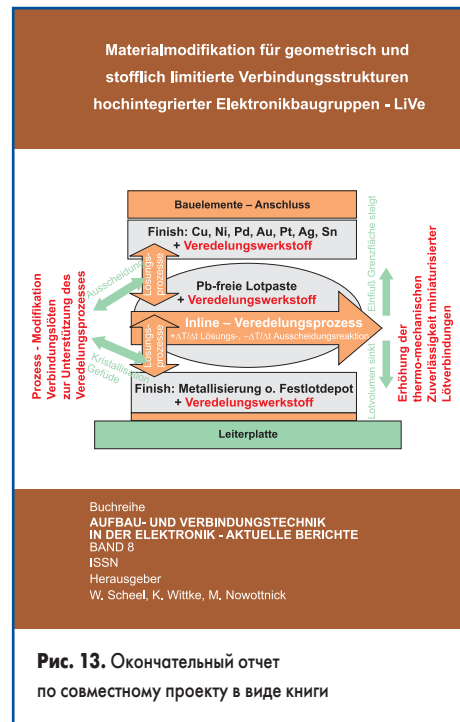


Рис. 13. Окончательный отчет по совместному проекту в виде книги

Литература

1. Scheel W., Wittke K., Nowotnick M. Innovative Produktionsprozesse für die Hochtemperatur-Elektronik am Beispiel der KFZ-Elektroniksysteme. Mai 2005.
2. Kerr K., Chawla N. Creep deformation behavior of Sn-3.5Ag solder/Cu couple at small length Scales. Acta materialia 52, 2004.
3. Villain J., Brüller O., Qasim T. A Comparison of the Creep Characterization of Solder Materials by Using Viscoplastic and Arrhenius Theories. TDM 2000, 3rd International Conference on Mechanics of Time Dependent Materials, Erlangen, Germany, 17-20.9.2000.
4. Poech M.-H. Schädigungsmechanismen in Lötverbindungen bei erhöhter Temperatur. VTE 14, 2002. Heft 1.
5. Snugovsky P., et al. Failure Mechanism of SAC305 and SAC405 in Harsh Environments and Influence of Board Defects Including Black Pad. SMTA Conf. Sept. 2006.
6. Dutta I. A Constitutive Model for Creep of Lead-Free Solders Undergoing Strain-Enhanced Microstructural Coarsening: A First Report // J. Electronic Mater., 32, 2003.