

Анализ роста микротрещин в бессвинцовой пайке смонтированных SMD-компонентов

Это исследование проведено для того, чтобы понять механизм возникновения термомеханических трещин в бессвинцовых паяных соединениях пассивных компонентов. В частности, в ходе данного исследования была сделана попытка определить места зарождения, характер и скорость распространения трещин. Для этого компоненты в форм-факторах R2512, R2010, R1206 и C1206 были смонтированы на печатной плате (FR4) толщиной 1,6 мм с помощью паяльной пасты Sn-Ag(3,8%)-Cu(0,7%) на площадках с химическим покрытием Sn и NiAu. Затем они подвергались циклическим температурным перепадам от -40 до $+125$ °C. Пробы брали через определенные интервалы: микрошлифы компонентов изучались на предмет поведения трещины, ее формы и скорости роста. Сборки с площадками с покрытием NiAu показали высокий уровень образования каверн (примерно 35% от площади вывода компонента) в отличие от площадок с покрытием оловом (10–15% от площади). Рост трещины происходит в толще припоя, причем не наблюдалось расслоения между припоем и интерметаллическим соединением. Возникновения трещин происходило в углах SMD резисторов и конденсаторов, а также у подошвы соединения у резисторов. Это согласуется с результатами компьютерного моделирования, которое показало максимальное накопление деформации сдвига в этих точках. Для всех исследованных случаев сборки с NiAu-покрытием показали гораздо более быстрый рост трещин, чем сборки с Sn-покрытием.

Пареш Лима (Paresh Limaye)
 Константина Ламбрино (Konstantina Lambrinou)
 Барт Ванделвелде (Bart Vandeveld)
 Дирк Вандепитте (Dirk Vandepitte)
 Берт Верлинден (Bert Verlinden)
 Барт Алларт (Bart Allaert)
 Джуст Хилларт (Joost Hillaert)

Перевод: Андрей Черняк

info@alphametals.ru

Введение

В настоящее время технология поверхностного монтажа (SMT) широко распространена в производстве электроники. Пассивные компоненты — поверхностно-монтируемые резисторы и конденсаторы — составляют основную часть от всего количества выпускаемых резисторов и конденсаторов. Раньше эти компоненты монтировались с помощью оловянно-свинцовых припоев. Тем не менее, с введением директивы EC RoHS с июля 2006 года производители перешли к альтернативным вариантам — без употребления свинца. Этот переход вызывает вопросы по многим пунктам, в частности, в отношении надежности пассивных SMD-компонентов при бессвинцовой пайке. Поверхностный монтаж пассивных компонентов с оловянно-свинцовым припоем ис-

пользовался на протяжении более 25 лет, и существует обширная база знаний по их надежности. Однако относительно бессвинцовых припоев данных пока мало.

Одной из причин выхода из строя элементов на печатной плате является термомеханическая усталость паяного соединения. Термомеханические усталостные разрушения происходят из-за несоответствия коэффициента теплового расширения (СТЕ) компонента и печатной платы. СТЕ типичного пассивного элемента лежит в пределах 5–10 ppm/°C, в то время как СТЕ печатной платы находится в диапазоне 16–18 ppm/°C. Когда печатную плату подвергают нагреву или охлаждению, компонент и плата сжимаются и расширяются с различной скоростью. Напряжение, возникающее из-за несоответствия СТЕ компонента и платы, воспринимается паяным соединением. В результате таких повторяющихся нагрузок в спайке возникает усталость, в конечном итоге приводящая к неисправности, когда усталостная трещина полностью прерывает электрическое и механическое соединение. На рис. 1 показаны снимки паяных соединений, обычно используемых при монтаже поверхностных компонентов.

Поверхностно-монтируемые резисторы и конденсаторы, как правило, имеют низкий профиль, и толщина паяного соединения под компонентом составляет 30–80 мкм. Таким образом, возникает необходимость обеспечить податливость подобного соединения.

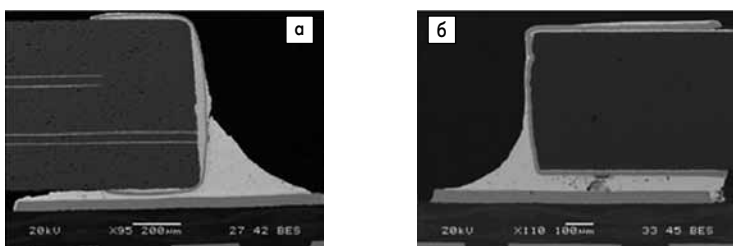


Рис. 1. Форма паяных соединений для поверхностного монтажа: а) резистора; б) конденсатора

Таблица 1. Размеры компонентов и контактных площадок

Деталь	Компонент, мм			Контактная площадка, мм	
	Длина	Ширина	Толщина	Длина	Ширина
R2512	6,53	3,2	0,55	1,01	3,43
R2010	5,08	2,54	0,55	0,89	2,8
R1206	3,25	1,6	0,55	0,89	2,03
C1206	3,25	1,6	0,7	1,27	2,03

Методика эксперимента

Работа, представленная в статье, является частью более широкого исследования, цель которого — более четко понять усталостную долговечность пассивных компонентов с бессвинцовым паяным соединением: где происходит сбой, когда они происходят и как быстро распространяется усталостная трещина — в основном для SnAgCu сплавов. В данном случае мы сосредоточимся на получении оценок промежутков времени, в которые усталостная трещина возникает и распространяется. Эта информация необходима для разработки дальнейшей стратегии изучения усталостных трещин бессвинцовой пайки SMD-компонентов.

В качестве тестовой мы использовали печатную плату, разработанную Varco Electronics Manufacturing. Эта тестовая плата, кроме других компонентов, содержит массивы резисторов и конденсаторов из широкого диапазона размеров. В этой работе были исследованы следующие SMD-резисторы — R2512, R2010, R1206 и SMD-конденсатор — C1206.

Наименование этих компонентов основано на стандартных промышленных названиях резисторов и конденсаторов в зависимости от их длины и ширины. Например, R2010 относится к резистору с длиной 5,08 мм и шириной 2,54 мм.

Все компоненты были собраны на восьмислойной плате из FR4 толщиной 1,6 мм. В исследовании оценивались паяные соединения с контактными площадками с химическим покрытием оловом и Ni/Au. Платы были произведены компанией Varco Prints и собраны Varco Electronics Manufacturing. Для монтажа использовалась паяльная паста Sn-Ag(3,8%) Cu(0,7%). В таблице 1 представлены номинальные размеры компонентов и контактных площадок. В процессе сборки использовались стандартные процедуры поверхностного монтажа, в том числе трафаретная печать, нанесе-

ние паяльной пасты, установка компонентов и оплавление. На рис. 2 показаны уже смонтированные детали.

Собранные платы подвергались циклическим перепадам температуры от -40 до +125 °С. Этот стандартное ускоренное испытание используется в автомобильной промышленности. Цикл содержал периоды 15-минутного повышения и понижения температуры, а также 15-минутные периоды выдержки на обеих крайних температурах. Проводилась оценка ожидаемой усталостной долговечности устройств в сравнении с некоторыми эмпирическими моделями и изымались образцы для изучения. Впоследствии их разрезали вдоль, и измерялась длина обнаруженной в спайке трещины. Для того чтобы измерить длину трещины на площадке, анализировалась фотография средствами UTSCSA. Это программное обеспечение позволяет пользователю выделить участок изображения и подсчитывает количество пикселей. Подсчет пикселей откалиброван по изображениям образцов с известной длиной, снятых с тем же увеличением, что и трещины в спайке.

Моделирование методом конечных элементов

Моделирование проводилось с использованием программного обеспечения MSC Marc Finite Element. Моделирование «ползучести» материала крайне важно для моделирования напряженно-деформированного поведения припоя. Хотя несколько моделей были опубликованы, пока еще не существует общепринятой модели. В этой работе использовалась модель, описанная S. Wiese и др. [1]:

$$\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-21} \times \sigma^{18} \exp\left(\frac{-9994,59}{T}\right),$$

где T — температура паяного соединения, К; σ — приложенное механическое напряжение, МПа.



Рис. 2. SMD-компоненты, установленные на плате

Для модуля упругости сплава SnAgCu использовались значения, опубликованные Darveaux для припоя SnAg:

$$E = 52\,400 - 193T,$$

где T — температура паяного соединения, °С; E — модуль упругости (Юнга), МПа.

А. Syed и др. в своей работе [2] оценили использование различных моделей «ползучести» припоя и обнаружили, что предсказания усталостной долговечности согласно большинству этих моделей лежат близко друг к другу. Кроме того, они также пришли к выводу, что модели, которые рассматривают только «ползучесть» (не принимая во внимание пластическую деформацию), могут быть использованы при разумном соотношении с экспериментальными данными усталостной долговечности.

Все остальные элементы платы были смоделированы как линейные эластичные материалы. Некоторые свойства материалов, используемых в различных элементах платы, перечислены в таблице 2. На рис. 3 показаны области, в которых проявляется накопленная деформация.

Таблица 2. Свойства материалов, использованных в моделировании

Материал	Модуль Юнга	СТЕ, ppm/°C
FR4	22	17
Медь	82,74	16,7
Алюминий	300	7

Анализ микроструктуры

Микроструктурный анализ микрошлифов образцов проводился с помощью светового оптического микроскопа и электронного сканирующего микроскопа с рентгенологическим спектрометром.

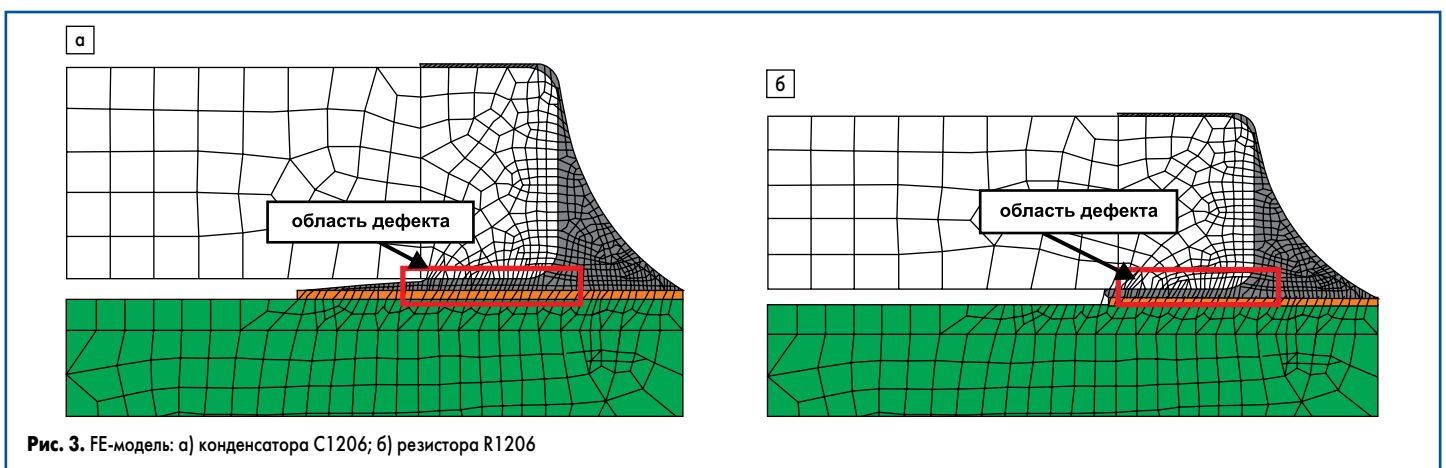
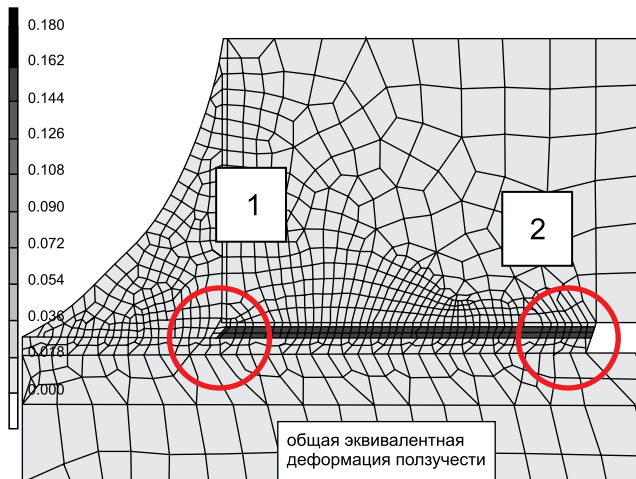


Рис. 3. FE-модель: а) конденсатора C1206; б) резистора R1206

Цикл: 420
Время: 1.260e+04

а



Цикл: 420
Время: 1.260e+04

б

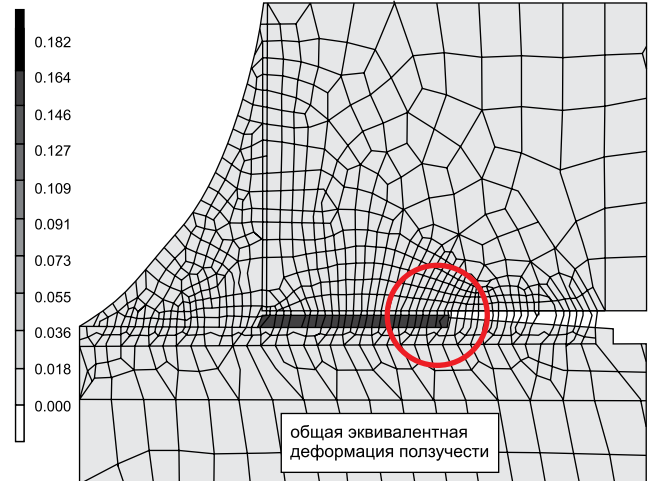


Рис. 4. Накопление механических напряжений в паяном соединении: а) резистора R2512: 1 — у торца; 2 — у края пайки под компонентом; б) конденсатора C1206

Результаты моделирования FE и обсуждение

Резисторы

Обнаружены две основные области с большой энергией деформации в трех моделируемых резисторах. Это (1) — торец компонента и (2) — нижняя часть спайки (рис. 4а). Средние значения деформации и средней плотности энергии деформации на всех трех моделируемых резисторах очень близки друг к другу (табл. 3). Этого следовало ожидать, поскольку размеры контактной площадки (а значит, и объема припоя) увеличиваются с ростом размера компонента, и, следовательно, величина средней деформации, приложенной к припою, остается в том же диапазоне.

Таблица 3. Результаты моделирования

Компонент	Средняя деформация сдвига, %	Средняя плотность энергии деформации, МПа
R1206	0,812	0,34
R2010	0,923	0,386
R12512	0,895	0,373
R1206	0,905	0,361

Конденсаторы

Самое большое накопление деформации сдвига расположено в нижней части компонента моделируемого конденсатора C1206. Сдвиг при растяжении и плотность энергии деформации выше, чем для R1206, который имеет такую же длину и ширину, но меньшую толщину.

Измерение роста трещины

Исследования показывают, что есть множество факторов, которые влияют на долговечность паяных соединений SMD-резисторов и конденсаторов. Это взаимное расположение паяных соединений, толщина и угол кромки, а также размеры контактных площадок. В литературе широко представлены оценки усталостной долговечности для паяных соединений для SMD-резисторов и конденсаторов.

В работе J. C. Suhling и др. [3] для типоразмера R2512 с паяльной пастой SnAgCu на плате 1,6 мм и термопрофилем от -40 до +125 °C была продемонстрирована долговечность около 5000 циклов. С. Andersson и др. [4] в их работе по изучению резисторов R1206 также сообщили об инициации трещины в период между 1000-м и 1500-м циклом температурных перепадов от -55 до +125 °C с тем же временем выдержки, что и в нашей работе. Результаты FE-моделирования в сочетании с эмпирической зависимостью скорости роста трещины в предыдущей работе (имеется в виду та же работа С. Andersson [4]) дают оценку долговечности в диапазоне 3000–4000 циклов. На основе этой оценки был запланирован анализ компонентов через каждые 500–600 циклов.

Было показано, что после начала циклов на всех резисторах были отмечены трещины на 50–80% от общей толщины припоя после 600 циклов. Поэтому мы брали дополнительные образцы, чтобы собрать больше информации об инициации и росте трещины до завершения 600 циклов. Это позволило сократить количество образцов для анализа, и поэтому только 10–15 компонентов было доступно для каждого типа и каждого интервала времени. Ограниченное число образцов также

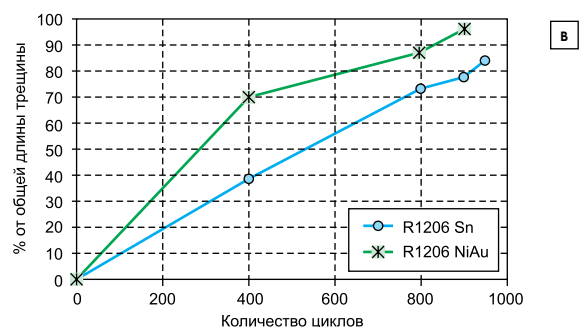
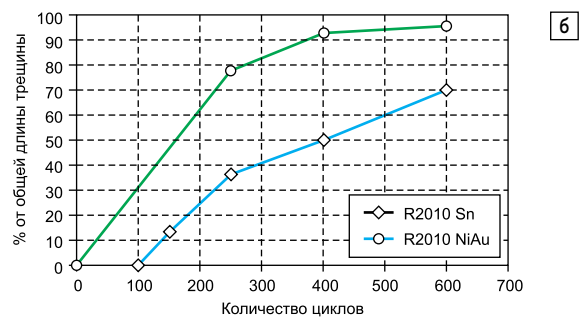
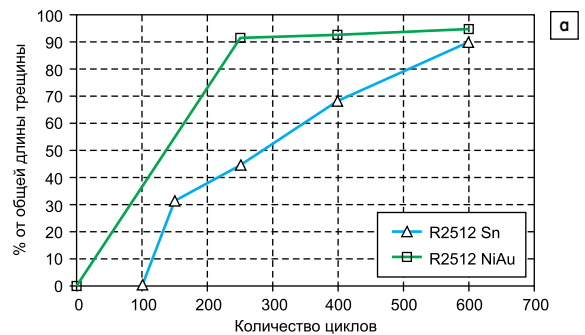


Рис. 5. Рост трещины в пайке: а) R2512; б) R2010; в) R1206

Таблица 4. Скорость роста длины трещины

Компонент	Покрытие площадки	Скорость роста трещины (линейная), мкм/цикл
R2512	Sn	1,12
R2512	NiAu	2,57
R2010	Sn	0,953
R2010	NiAu	1,68
R1206	Sn	0,525
R1206	NiAu	0,5796

стало причиной того, что результаты, полученные для конденсаторов C1206, не будут представлены в этой статье.

На рис. 5 показано поведение скорости роста трещины (длина трещины нормирована на общую доступную ее длину) для компонентов R2512, R2010 и R1206 соответственно в зависимости от числа циклов. Эти графики созданы на основе микрошлифов порядка 400 компонентов. У компонентов R2512 и R2010, собранных на контактных площадках с NiAu-окрытием, темп роста трещины на 50–100% выше по сравнению с собранными на площадках с Sn-покрытием. Разница в скорости роста трещины для R1206 (устройства собраны на площадках с покрытием NiAu и Sn) составляет около 10%. Предполагаемые темпы роста трещины перечислены в таблице 4.

Распространение трещины

Сложилось общее мнение, что есть два этапа образования трещины при поверхностном монтаже резисторов и конденсаторов:

- быстрый рост трещин в припое под компонентом;
- замедленный рост трещины на 45° через галтель припоя.

В компонентах, рассматриваемых здесь, различие было замечено между началом роста трещин для резисторов и конденсаторов.

Резисторы

Согласно результатам FE-моделирования, есть две области в толще припоя с наибольшим деформационным напряжением: в углах компонента и нижней части паяного соединения. При анализе микрошлифа резисторов было замечено, что инициация трещины действительно имеет место в двух указанных местах (рис. 6а). Две трещины распространяются навстречу друг другу и сливаются в одну под краем компонента. Кроме того, трещина, появляющаяся на краю компонента, распространяется в две стороны — под компонентом и в сторону галтели припоя. После этой стадии наблюдаются два разных направления распространения трещины. Трещины идут или под углом примерно 45° через галтель припоя (рис. 6б), или вверх по металлизации компонента. В некоторых случаях наблюдаются оба пути распространения.

Конденсаторы

Инициация трещины в монтаже SMD-конденсаторов начинается, как правило, недалеко от нижней кромки паяного соединения в соответствии с FE-моделью. Это было установлено во время экспериментов (рис. 6в).

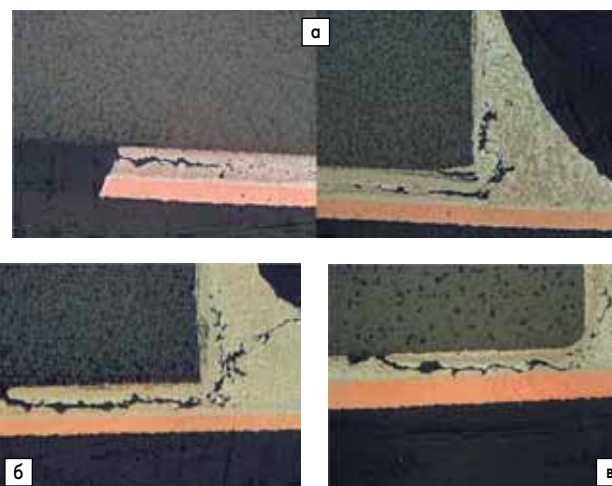


Рис. 6. Рост трещины: а) в паяном соединении R1206; б) в галтели припоя; в) в паяном соединении C1206

Трещина распространяется вдоль толщи припоя под основание компонента. После 1000 циклов ни один из конденсаторов, как на Sn, так и на NiAu-площадках, не дал сбой. В то же время некоторые образцы показали полное растрескивание припоя под компонентом; никаких трещин, проходящих через галтель припоя, не наблюдалось, и, следовательно, нет никакой информации о поведении трещины в этой области.

Изучение формы трещины

При измерении длины трещины возникает вопрос: где в компоненте сделать микрошлиф? Если взглянуть на результаты FE-моделирования (которое показывает распределение деформаций в паяном соединении в нулевой момент времени), самое высокое напряжение накапливается в углу компонента (и для резисторов, и для конденсаторов), а также под компонентом в нижней точке спайки. Эти точки находятся там, где трещины наиболее вероятны. Интересно знать, как форма трещины меняется с ее ростом. Для того чтобы исследовать точный характер распространения трещин, резисторы R2512 были рассечены вдоль ширины с шагом 500 мкм на различных этапах термоциклирования. В изучении каждого микрошлифа были записаны длина и местоположение трещины. На основе этих измерений были сделаны двухмерные карты области трещины (рис. 7а). Линии, параллельные длине компонента, показывают, где были сделаны микрошлифы, а заштрихованные зоны — это область трещины.

Эти области были рассчитаны на основе измерений трещин и наблюдаемых структурных дефектов в массиве припоя, таких как пустоты. Видно, что трещина перемещается примерно параллельно длине контактной площадки. На рис. 7б показаны различные этапы распространения трещины для резистора R1206.

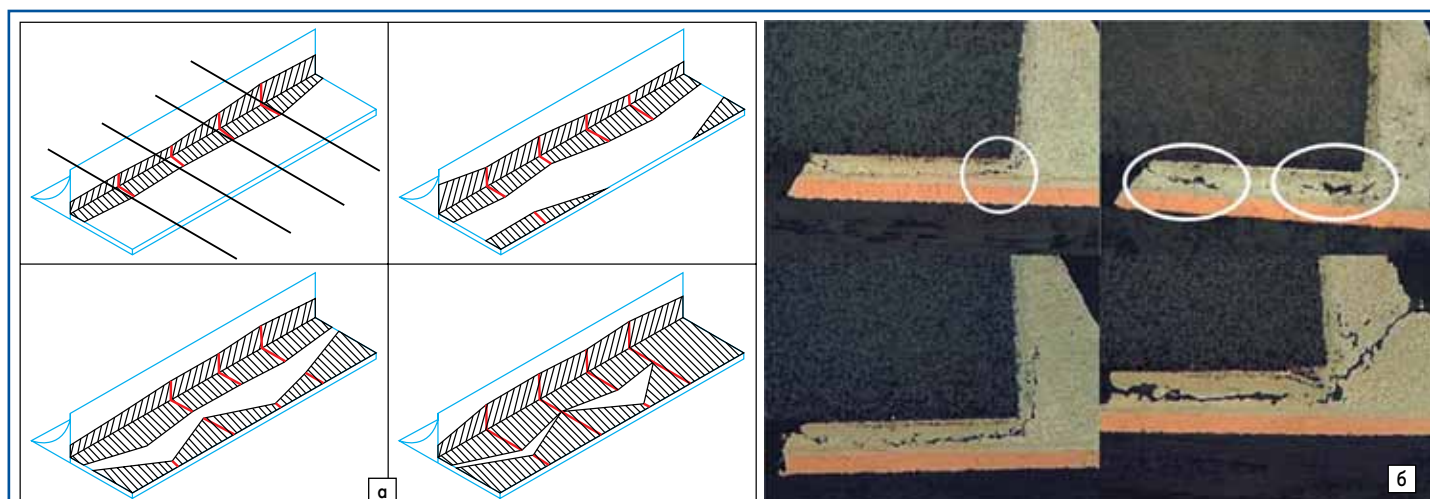


Рис. 7. Развитие трещины: а) в паяном соединении R2512 на основе микрошлифов на различных этапах термоциклирования; б) в паяном соединении R1206

Влияние пустот

Образование пустот является общей чертой для всех наблюдаемых сборок поверхностного монтажа. Образование пустот происходит во время пайки оплавлением, когда летучие вещества из флюса оказываются окруженными расплавленным припоем при плавлении паяльной пасты. В некоторых исследованиях было сказано, что более высокий уровень образования пустот происходит при пайке на площадках с химическим покрытием NiAu по сравнению с площадками с другими типами покрытий. Наше исследование показало гораздо более высокий уровень образования пустот для резисторов, припаянных на NiAu-площадки, по сравнению

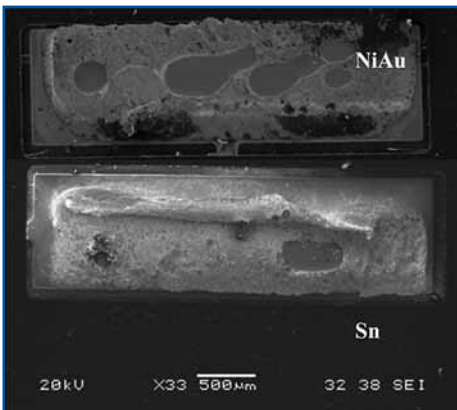


Рис. 8. Изображения, полученные с помощью детектора вторичных электронов, показывающие появление пустот на площадках с Sn и NiAu покрытием

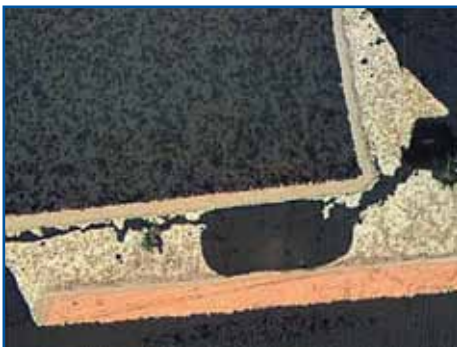


Рис. 9. Резистор R2512, смонтированный на контактной площадке с NiAu-покрытием

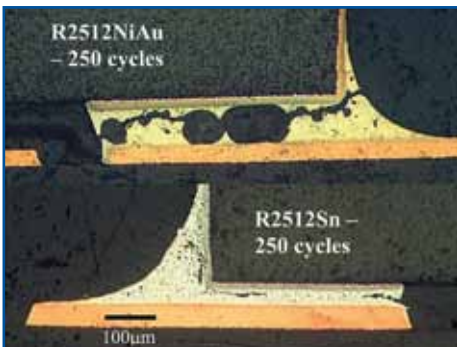


Рис. 10. Влияние образования пустот на изменения в паяном соединении

с площадками с химическим Sn-покрытием. Это отчетливо видно на изображениях, полученных с помощью электронного сканирующего микроскопа (рис. 8), где изображены контактные площадки после удаления компонентов. На рис. 9 представлен поперечный разрез резистора R2512 на площадках с NiAu-покрытием.

Влияние пустот на надежность паяных соединений остается спорным вопросом. Есть исследования, показывающие некоторое влияние большого числа пустот на надежность пайки, а другие специалисты не установили эффекта зависимости долговечности паяного соединения от количества пустот для нормально смонтированных SMD-компонентов. Хотя обсуждение количественной зависимости надежности пайки от образования пустот выходит за рамки этой статьи, тем не менее, качественная зависимость все же наблюдалась. Основываясь на измерениях, проведенных на микрошлифах резисторов R2512 и R2010 (на NiAu-площадках), было подсчитано, что пустоты занимают порядка 35% объема припоя под компонентом по сравнению с 10–15% для R2512 и R2010 на Sn-площадках. Одним из последствий образования пустот является увеличение просвета под компонентом.

На рис. 10 показано сравнение пайки компонента R2512 на площадках NiAu и Sn. Наличие пустот приподнимает компонент вверх и значительно снижает толщину галтели припоя.

Анализ неисправностей

Как было сказано ранее, компоненты, смонтированные на NiAu-площадках, демонстрируют намного более быстрый рост трещин по сравнению с компонентами на Sn-площадках. Существует широко известный тип неисправности, связанный с применением NiAu-покрытия контактных площадок, называемый «хрупкое разрушение». В этом случае расслоение между интерметаллическим слоем и припоем вызывает очень ранние отказы. Тем не менее, в данных образцах все отказы для компонентов, собранных на NiAu-площадках, были связаны с пластичным усталостным разрушением, то есть усталостные трещины распространяются в толще припоя без отделения от интерметаллического слоя. Это можно видеть на рис. 11 и 12, где представлены компоненты R2512 и R1206 после 250 и 800 циклов соответственно.

На рис. 13 показана поверхность трещины в паяном соединении R2512 для площадок с NiAu и Sn покрытием соответственно. Поверхность покрыта рябью, что указывает на пластичное усталостное разрушение. В резисторах на площадках с Sn-покрытием также произошло пластичное разрушение. Микроструктура соединений показывает объемный массив олова с диспергированными в нем вкраплениями частиц интерметаллических соединений Cu-Sn и Ag-Sn. На конденсаторах (C1206), собранных на NiAu-площадках, началось некоторое растрескивание, в то время как интерметаллические частицы Au-Sn наблюдались как в массиве олова (наряду

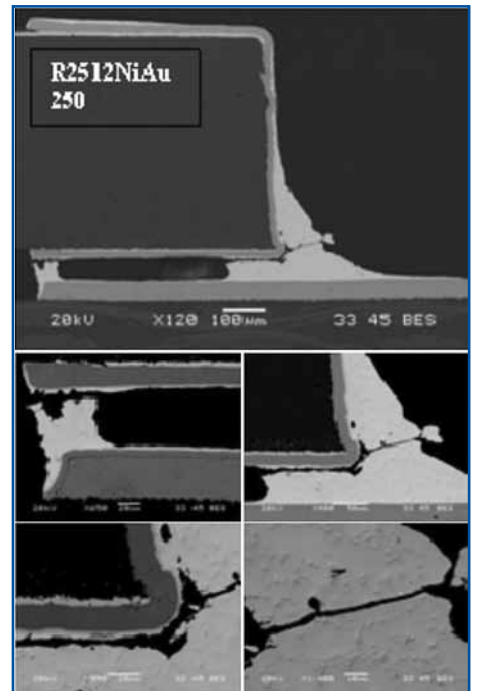


Рис. 11. Пластические разрушения в паяном соединении компонента на NiAu-площадке

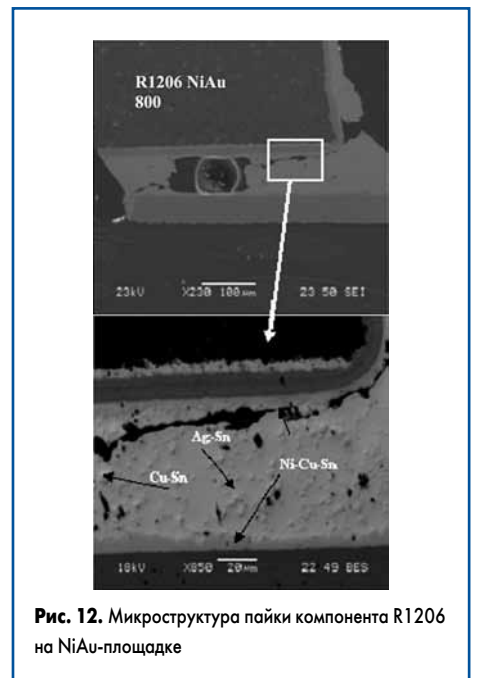


Рис. 12. Микроструктура пайки компонента R1206 на NiAu-площадке

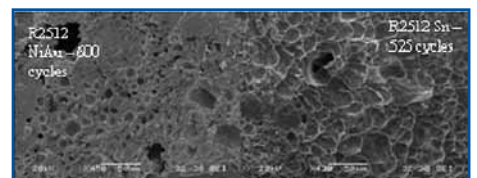


Рис. 13. Поверхность трещины с характерной рябью пластического разрушения на NiAu и Sn площадках

с Cu-Sn и Ag-Sn частицами), так и в непрерывном Sn-Cu-Ni интерметаллическом слое, образованном между припоем и металлизацией компонента (рис. 14). Однако хрупких интерметаллических расслоений не наблюдалось даже после 1000 циклов. Конденсаторы, собранные на площадках с Sn-покрытием, по-

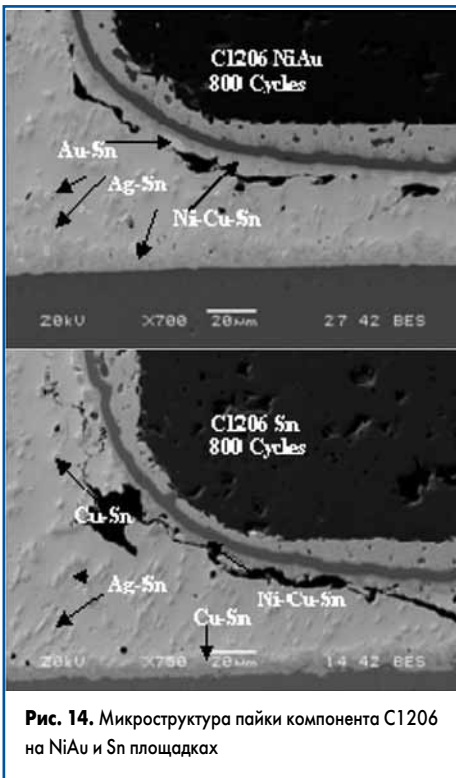


Рис. 14. Микроструктура пайки компонента C1206 на NiAu и Sn площадках

казали большее количество трещин, но так же, как и во всех других случаях, трещина проходила в толще припоя.

Заключение

В этой работе была предпринята попытка понять природу термомеханических дефектов, установить места инициации трещины и определить приблизительную эволюцию трещины. Для этого компоненты R2512, R2010, R1206 и C1206 были смонтированы на FR4 печатной плате с двумя видами химического покрытия контактных площадок — Sn

и NiAu. Из этого исследования можно сделать следующие выводы:

- Рост трещины во всех случаях проходил в толще припоя в результате пластичного разрушения.
- Места образования и пути распространения трещин одинаковы для контактных площадок с обоими рассмотренными видами покрытий.
- У резисторов иницирование трещины происходит в двух местах: это торец компонента и нижний край паяного соединения. Трещина от края пайки распространяется внутрь толщи припоя, в то время как трещина от торца компонента распространяется в двух направлениях — под компонент, навстречу другой трещине, и через галтель (или же вдоль металлизации компонента).
- У конденсаторов трещина начинается у нижнего края паяного соединения под компонентом. В проведенных экспериментах (более 1000 циклов) не наблюдалось трещин в галтели.
- FE-моделирование показало, что области с наибольшим накоплением деформации совпадают с местами появления трещин как у резисторов, так и у конденсаторов.
- Была определена плоская форма трещины для некоторых образцов с помощью нескольких продольных микрошлифов компонента. Фронт небольших трещин, очевидно, зависит от распределения деформационных напряжений, но с увеличением области трещины фронт распространяется примерно параллельно длинной стороне контактной площадки по всей ширине компонента.

Таким образом, при малых размерах трещин, длиной трещины нужно считать среднее значение между измерениями с краю и по центру компонента, а при большей длине трещи-

ны это не столь важно из-за относительной ее равномерности.

- Образование пустот, очевидно, оказывает положительное влияние на скорость роста трещин, что было показано на компонентах R2512 и R2010 на площадках с NiAu-покрытием.

В результате этой работы был разработан новый испытательный стенд для обнаружения и исследования появления трещин, их развития и факторов, влияющих на это, а также скорости роста трещин в паяных соединениях пассивных SMD-компонентов с использованием бессвинцового SnAgCu-припоя.

Литература

1. Wiese S., Meusel E., Wolter K. J., Microstructural Dependence of Constitutive Properties of Eutectic SnAg and SnAgCu Solders. Proceedings of the 53rd Electronic Components and Technology Conference, 2003.
2. Syed A. Accumulated creep strain and energy density based thermal fatigue life prediction models for SnAgCu solder joints. Electronic Components and Technology (ECTC), 2004. Proceedings.
3. Suhling J. C., Gale H. S., Johnson R. W., et al. Thermal cycling reliability of lead free solders for automotive applications. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITHERM). The Ninth Intersociety Conference on Volume 2, 1–4 June 2004.
4. Andersson C., Andersson D. R., Tegehall P.-E., Liu J. Effect of different temperature cycle profiles on the crack propagation and microstructural evolution of lead free solder joints of different electronic components. 5th. Int. Conf. on Thermal and Mechanical Simulation and Experiments in Micro-electronics and Micro-Systems. EuroSimE 2004.