

Продолжение. Начало в № 8`2008

# Повышение надежности за счет миниатюризации?

## Некоторые результаты проекта LiVe (Limitierte Verbindungen — лимитированные соединения).

### Часть 2. Результаты различных методов измерений

**В представленной в данном номере второй части статьи кратко описаны использованные методы испытаний и их особенности для миниатюризованных электронных модулей; приведены первые результаты электрических измерений, результаты испытания на падение (Drop test), а также растворение металлов в новой комбинации материалов. На примере оценки силы при испытании на срез объяснены возможности последующего ускорения методов тестирования.**

Уве Папе (Uwe Pape)

Uwe.Pape@volkswagen.de

Петер Фрюауф  
(Peter Frühauf)

Юрген Фрайтаг  
(Jürgen Freytag)

Перевод: Андрей Новиков

andrej.novikov@uni-rostock.de

#### Краткое описание

В данной статье представлены выборочные результаты из работы по проекту «Модификация материала для конструкций соединений с ограничением размеров и материала в электронных модулях с высокой степенью интеграции», профинансированному Министерством образования и науки Германии (BMBF — Bundesministerium für Bildung und Forschung). Сокращенное название проекта — LiVe (Limitierte Verbindungen — лимитированные соединения). В основном в данной статье представлены в сокращенном виде материалы докладов с консультационного семинара в рамках выставки SMT/Hybrid&Packaging 2008. В связи с этим доклады тематически 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.

#### Методы тестирования для определения качества и надежности

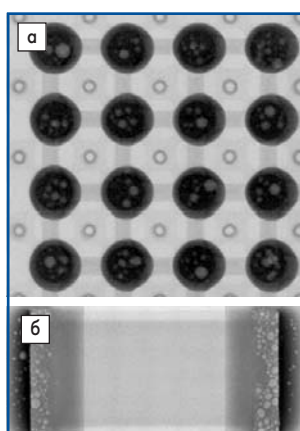
##### Рентгеновский анализ

Методы тестирования технологии монтажа и соединений должны предоставить результаты, которые позволяют провести анализ надежности компонентов и электронных модулей. Уже на ранней стадии они должны обеспечить надежность процесса, позволить распознать причины преждевременных отказов, а также показать и спрогнозировать механизмы отказов. Опираясь на данную интерпретацию разницы адсорбции рентгеновского излучения, мо-

жет быть очень хорошо представлен электронный модуль и его отдельные компоненты, а также его морфологическое состояние (поры, перемычки припоя) (рис. 1). Из чего довольно просто можно сделать соответствующие выводы о качестве паяных соединений. Этот метод также можно без ограничений использовать и для миниатюризованных компонентов, однако при неизменяющемся размере электронных модулей область исследования расширяется и разрешение повышается. Для проведенных исследований в проекте LiVe не было обнаружено никаких ограничений по применению данного метода.

##### Электрическое тестирование

Для функций электронных модулей наряду с термическими и механическими свойствами решающее значение имеют электрические свойства. При этом электрическая функция в зависимости от электрических параметров тока и напряжения может присутствовать или же быть прерванной при различной степени деградации. Эти аспекты очень тяжело распознать во время исследования на тестовой печатной плате, так как в стандартных приборах для измерения сопротивления, в зависимости от области измерения, используется определенное значение тока. Тем не менее, как правило, можно обобщить, что в ходе испытания может быть проведено такое электрическое измерение, которое даже при ускоренном старении (онлайн или оффлайн) может дать информацию о функционировании или дефекте паяного соединения. Хотя это измерение часто охватывает только омическое сопротивление, из результатов можно с определенным допуском сделать выводы об актуальной степени деградации паяного соединения. Для автоматической быстрой записи информации о способности функционировать всех контактов одного компонента эти контакты соединяются вместе



**Рис. 1.** Пример рентгеноскопии паяных соединений с порами:  
а) шарики припоя компонента LFBGA;  
б) CR2512

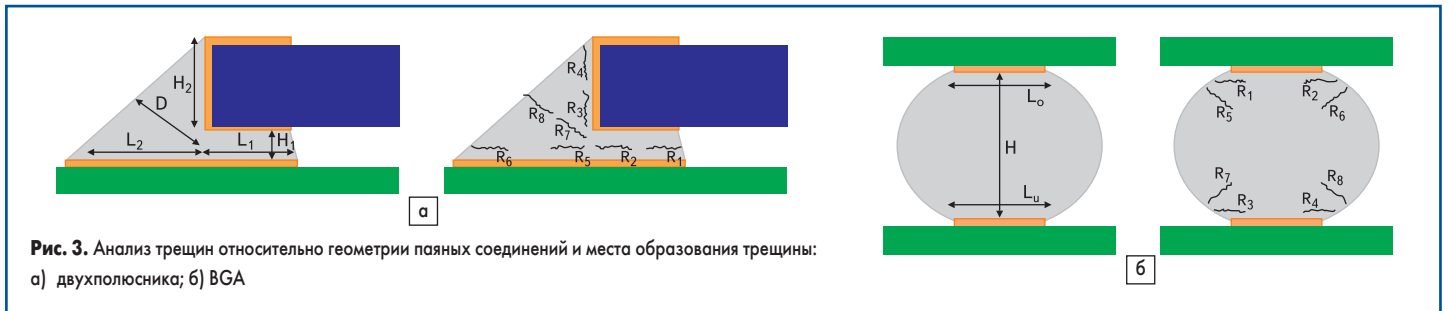


Рис. 3. Анализ трещин относительно геометрии паяных соединений и места образования трещины: а) двухполюсника; б) BGA

(последовательно, схема daisy chain), так что одного измерения достаточно, чтобы протестировать работоспособность всех контактов. Хотя таким образом и нельзя локализовать дефектный контакт в случае отказа, однако на практике, как правило, не имеет значения, какой из дефектных контактов ведет к полному отказу компонента.

Проведенное испытание на удар при падении представляет собой исключение в принятом в этом проекте принципе измерений, так как в данном случае в момент наибольшего ускорения электрические соединения часто размыкаются, но при уменьшении нагрузки они потом замыкаются. Измерение в режиме оффлайн может вести к значительным изменениям при детектировании отказов, особенно для критических компонентов (LFBGA): измерение проводилось в режиме online в области микросекунд, что позволяло зафиксировать даже наименьшие изменения. Однако проведение подобных измерений значительно усложняет тестирование.

**Механическая прочность при испытании на срез**

Испытание на срез представляет собой разрушающий метод, при использовании которого электронные компоненты механически срезаются. При испытании на срез электронных компонентов обычно детектируются шесть различных типов отказов, так называемых степеней разрушения. При получении результатов в данном проекте были учтены как максимальная сила при испытании на срез, так и соответствующая степень разрушения. Испытания на срез были проведены поэтапно с учетом различного уровня старения. Полученная сила при испытании на срез была соотнесена с силой, определенной в исходном состоянии. Тем самым уменьшение силы при испытании на срез вследствие повреждения паяного соединения дает информацию о старении компонента. С помощью испытания на срез механическое разрушение паяного соединения за счет старения может быть показано более явно, нежели с помощью электрического измерения. Однако оно также ведет к тому, что после этого электронный модуль не может быть использован в соответствии со своим назначением.

**Металлографический анализ структуры**

При соответствующем учете вышесказанного в оставшихся электронных компонентах возможно проведение металлографического анализа, что было осуществлено в данном проек-

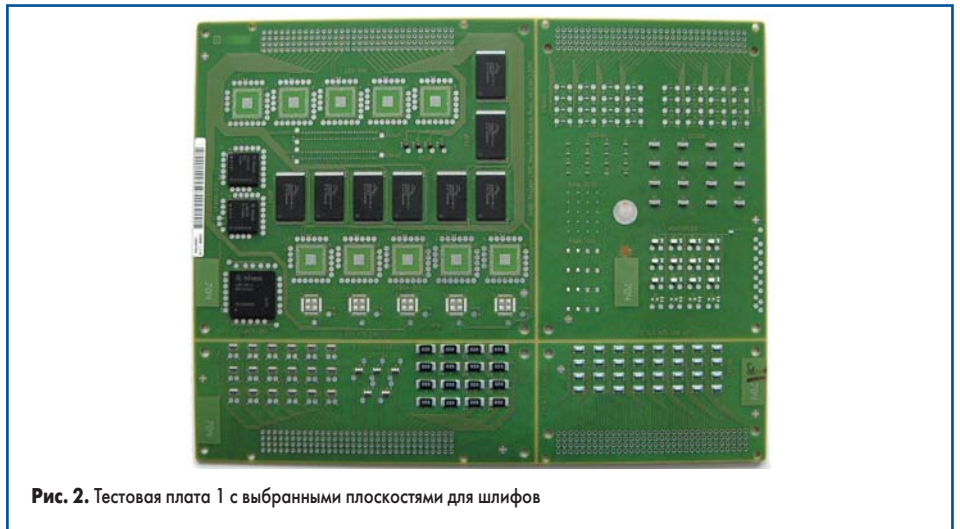


Рис. 2. Тестовая плата 1 с выбранными плоскостями для шлифов

те в большом объеме. Во-первых, микрошлифы использовались для металлографического анализа структуры (в том числе при помощи электронного микроскопа), а во-вторых — для анализа длины трещин. На примере тестовой платы 1 (рис. 2) показаны различные электронные компоненты, которые были подвергнуты металлографическому анализу.

Они были проанализированы по следующим параметрам:

- анализ структуры (форма дендритов и их размер, доля и форма эвтектики);
- характер, форма, расположение и доля ИМФ (ИМФ — интерметаллические фазы);
- расположение и размер пор;
- измерение длины трещин;
- доля рекристаллизованной структуры в паяном соединении (отдельные тестовые образцы после циклической нагрузки);
- измерения фаз на твердость (микро- и нанотвердость).

Большое количество исследуемых компонентов, а также их многообразие привели к усложнению данных исследований. Так, например, все BGA-компоненты были отшлифованы не как обычно — параллельно к краю компонента, а по диагонали. Это позволило сделать дополнительные выводы о влиянии внутренней структуры этих компонентов на надежность паяных соединений. Были выбраны соответствующие шариковые контакты компонента, которые подверглись анализу как относительно структуры, так и относительно трещин. Для возможности сделать выводы относительно трещин сначала были определены длина и вид трещин, что позволило понять степень влияния миниатюризации (рис. 3).

**Результаты электрических измерений**

Для реализации возможности измерения простого омического сопротивления на тестовых платах необходимо последовательно соединить компоненты в так называемую схему daisy chain, которая позволяет провести сравнительно простое испытание паяных контактов. Далее необходимо исключить из измерен-

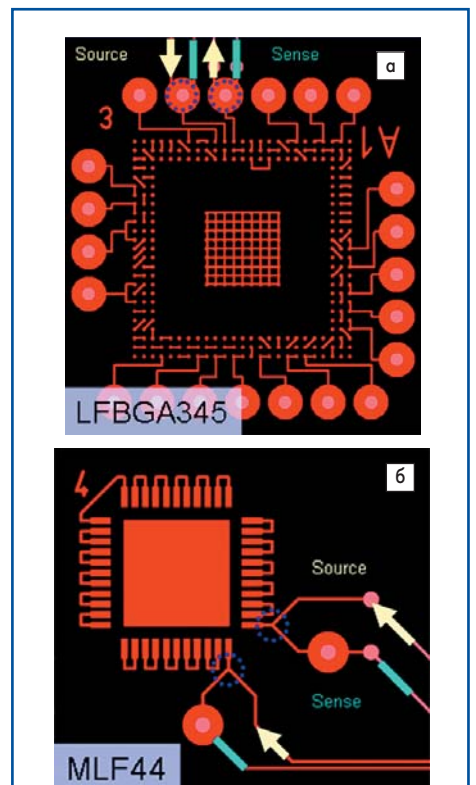
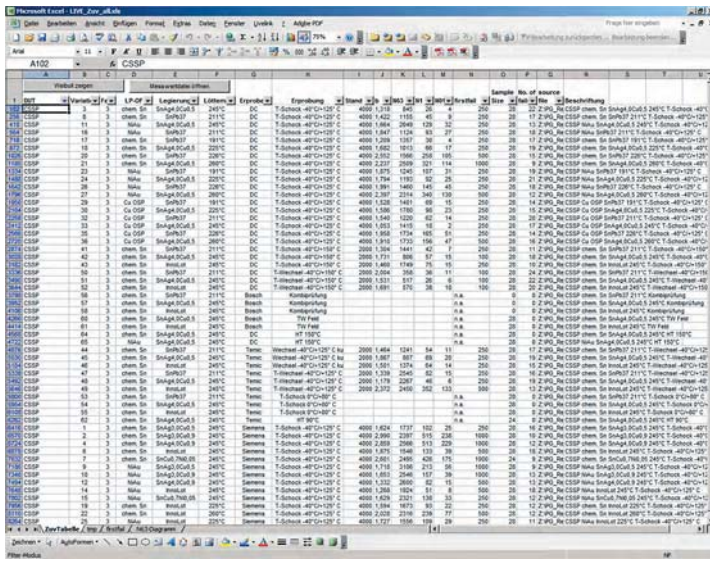
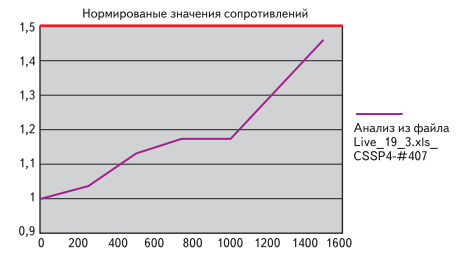


Рис. 4. Особенности электрического измерения

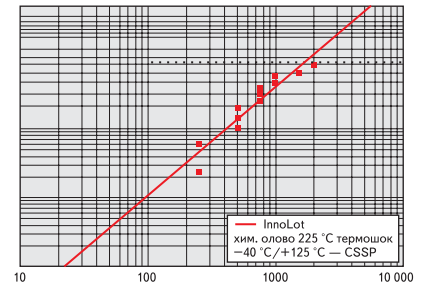
**Программа для оценки на базе MS Excel**



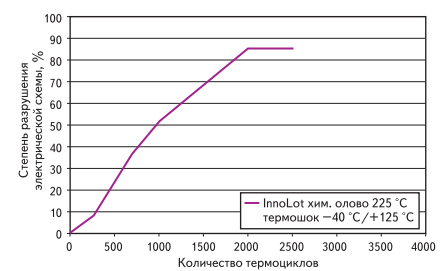
Кривая сопротивления



Кривая Вейбулла



Кривая отказов



**Рис. 5.** Возможности обработки данных электрического измерения

ли совмещены прямо на компоненте, а также на верхнем слое ПП, с целью увеличения точности измерений (рис. 4). Для детектирования первых размыканий в паяных соединениях, предположительно возникающих при повышенной температуре и носящих временный характер, в дальнейшем было решено провести измерения в режиме оффлайн при определенной температурной нагрузке, для того чтобы исключить исчезновение этого эффекта при окончании испытания.

Из-за большого объема запланированных испытаний и различных режимов ускоренного старения необходимо было разделить работу между партнерами, так что отдельные испытания проводились в различных местах. Для электрического измерения это означает необходимость более точно определить сам процесс измерения, особенно при измерении при повышенной температуре, для стандартизации полученных значений сопротивления. В ходе испытаний создавались файлы со значениями измерений в соответствии с оговоренным форматом, которые потом пересылались для анализа одному из партнеров.

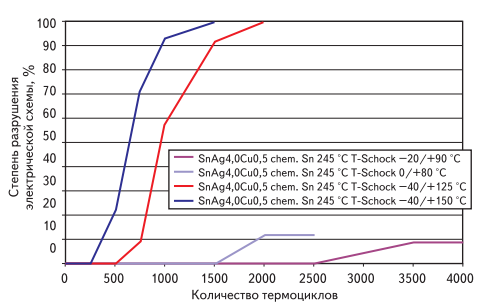
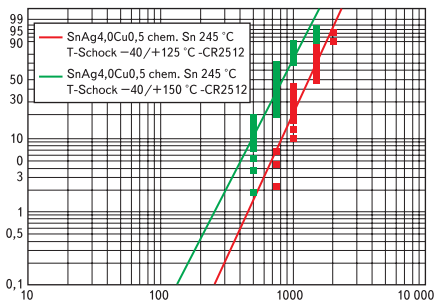
Специально для этой цели разработанная программа сопоставляет данные в соответствии с планом испытаний и позволяет экспортировать данные испытаний для сравнения. С помощью экспортированных данных по откатам соответствующих тестовых модулей возможно как построение диаграмм Вейбулла, так и прогнозирование отказов напрямую и их сравнение друг с другом (рис. 5).

Кроме того, это позволяет проанализировать любые тестовые модули относительно изменения сопротивления в качестве сравнительной величины по отношению к соответствующему исходному состоянию.

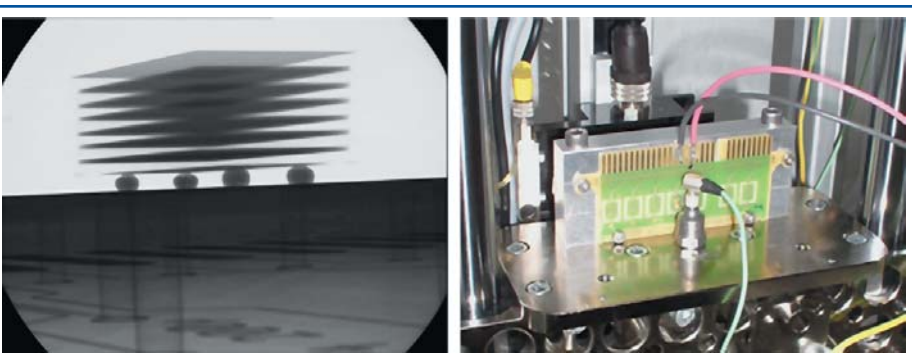
**Проект**

- SnAg4,0Cu0,5 chem. Sn 245 °C T-Schock -20/+90 °C
- SnAg4,0Cu0,5 chem. Sn 245 °C T-Schock 0/+80 °C
- SnAg4,0Cu0,5 chem. Sn 245 °C T-Schock -40/+125 °C
- SnAg4,0Cu0,5 chem. Sn 245 °C T-Schock -40/+150 °C

F/S	Общее число	b	N63	N1	N01
1/54	55				
3/74	77				
26/51	77	3,970	1453,352	456,223	255,159
44/33	77	3,602	924,232	257,742	135,844



**Рис. 6.** Анализ на примере компонента формы CR2512 (различные старения)



**Рис. 7.** Образцы для испытания на падение

ного значения сопротивления достаточно длинных проводников и/или повысить общую точность измерений и провести измерения с наименьшими погрешностями. Для достижения этой цели на всех тестируемых образ-

цах была предусмотрена возможность измерения с четырьмя зондами, которые одновременно позволяли проводить внутренний тест этих образцов. Входной (Source) и выходной (Sense) сигналы различных компонентов бы-

Относительный анализ позволяет не только провести сравнение между различными формами компонентов (с различными омическими сопротивлениями), но также прямое сравнение с определенным значением приемки. Соединения, сопротивление которых увеличилось на 50% по сравнению с исходным значением, считались отказами (рис. 6). Полученные данные были использованы далее в проекте, например, для определения факторов ускорения между различными режимами ускоренного старения.

**Классификация припоев с помощью испытаний на падение (Droptests)**

Для дальнейшей разработки паяльных материалов был предложен ряд новых припоев, которые не могут быть проверены на используемой в данном проекте тестовой печатной плате. Поэтому для предварительного отбора подходящих припоев была выбрана тестовая программа, которая должна была сравнить предложенные припои с помощью различных способов. Наряду с исключительно механическими испытаниями на прочность, сопротивление ползучести и исследованиями на расплавление были проведены испытания на падение (Droptests) с помощью специальных модулей.

Для этих испытаний Dummy-компоненты были присоединены шариковыми контактами к припоям, которые необходимо было протестировать, и припаяны к тестовым структурам. Печатные платы были нагружены вертикально и исследованы относительно направления нагрузки "in plane" (рис. 7). Из-за малой массы компонентов внутренние слои тестовых компонентов были утяжелены медью.

В ходе испытания на падение возможно осуществить наблюдение за компонентами в режиме онлайн, что и было реализовано при помощи осциллоскопа. При этом скорость и возможность зафиксировать отдельные изменения имели особое значение. В результате этих испытаний возможно определить число отдельных падений, которые выдерживают образцы без прерывания электрической функции. В предварительных испытаниях необходимо было прежде всего определить оптимальное ускорение, которое, с одной стороны, имеет ограниченные временные затраты, с другой стороны, также дает результаты, которые делают возможным дифференцирование припоев. В качестве конечной величины были определены 50–100 падений, которые ведут к общему ускорению образцов до 8900 g по сравнению с исходным состоянием. Наблюдался большой разброс результатов, в связи

с чем испытания на падение были только одним из трех способов для тестирования припоя. При испытаниях на падение (рис. 8) были в основном обнаружены такие отказы, как трещина либо со стороны компонента, либо со стороны печатной платы.

**Растворение металлов в зависимости от контактной поверхности**

Наряду с постановкой цели определить оптимальный припой для паяных соединений с ограничениями по геометрии и материалу в проекте было целенаправленно изучено влияние паяемых поверхностей контактируемых деталей. Для достижения этой цели и для предварительного отбора подходящего припоя был проведен ряд исследований по растворению. Кроме трех вариантов припоя, которые использовались в том числе для испытания на падение, поверхности припоя были модифицированы с целью определения влияния на скорость растворения. Наряду с известными вариантами финишного покрытия были использованы покрытия ENIG с различным содержанием фосфора и различные медные поверхности (осаждение с помощью постоянного и импульсного тока). Также было исследовано влияние последующего процесса нанесения паяльной маски за счет исключения этого процесса или замены его температурной нагрузкой в качестве симуляции процесса отверждения.

Для испытаний на растворение была использована ванна с расплавленным припоем, в которую погружались на различное время структуры из параллельных проводников (встречно-гребенчатые структуры). Во избежание наполнения ванны примесями расплавления использовался достаточно большой объем ванны (около 200 граммов расплава), который менялся каждый раз по прошествии 30 испытаний. В качестве дополнения для полной картины испытаний были проведены исследования при двух температурах (235 и 280 °C) и четырех различных длительностях погружения.

Скорость растворения определялась с помощью металлографии погружаемых образцов. Контактная площадка, которая не погружалась в расплавленный припой, служила сравнением для толщины меди. Значения толщины медных контактных площадок были измерены на каждой площадке 20 раз в определенном порядке, после чего высчитывалось среднее значение (рис. 9а). С помощью различного времени погружения для каждой комбинации припой — паяемая поверхность может быть определена скорость растворения, которая дает информацию о металлургической реакционной способности и тем самым о количестве образованных фаз (рис. 9б).

**Оценка технологических и контрольных параметров**

Во время процесса пайки расплавленный припой реагирует с соединяемыми деталями и образует, таким образом, сплошное соединение. Скорость реакции, а также глубина зо-

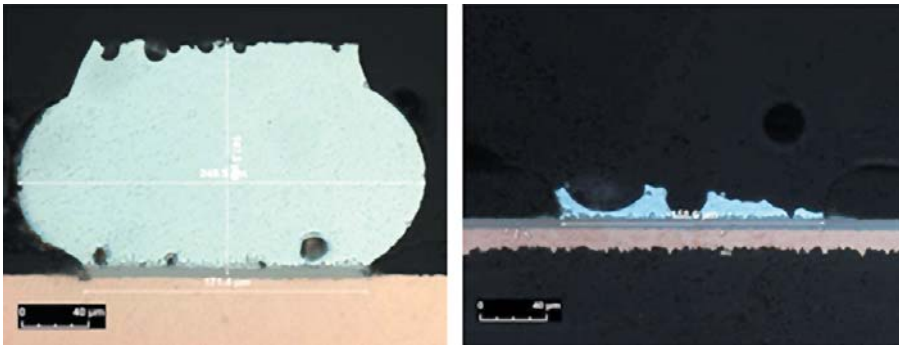


Рис. 8. Типы отказов при испытании на падение

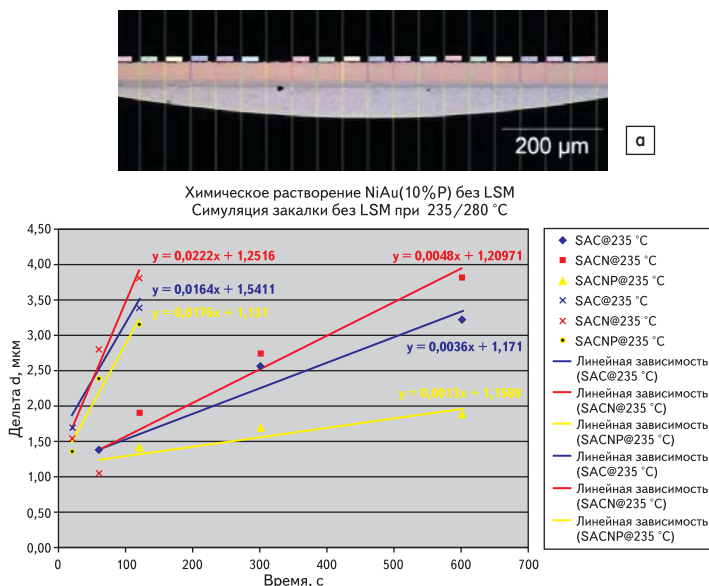


Рис. 9. Анализ испытания на растворение

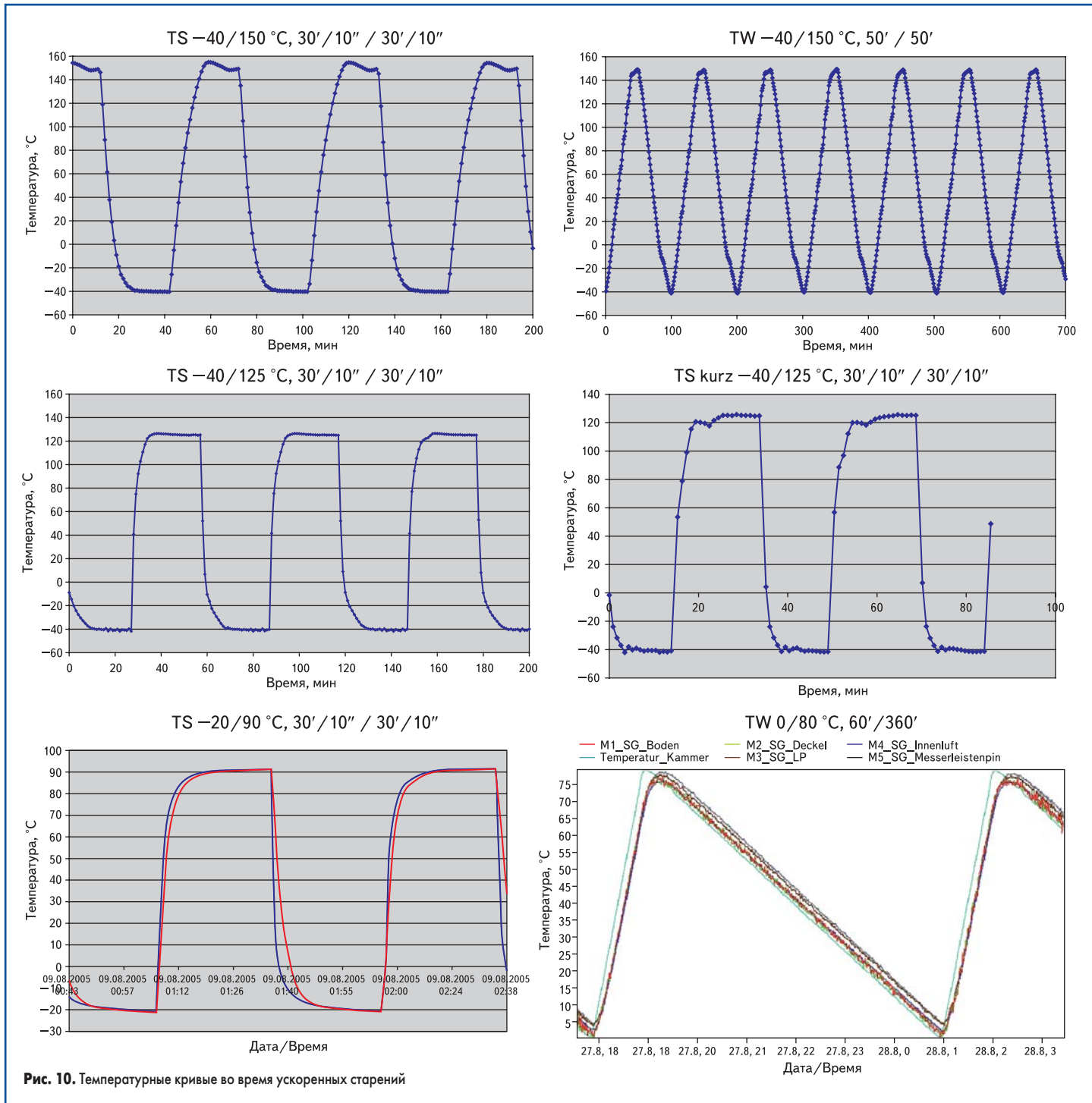


Рис. 10. Температурные кривые во время ускоренных старений

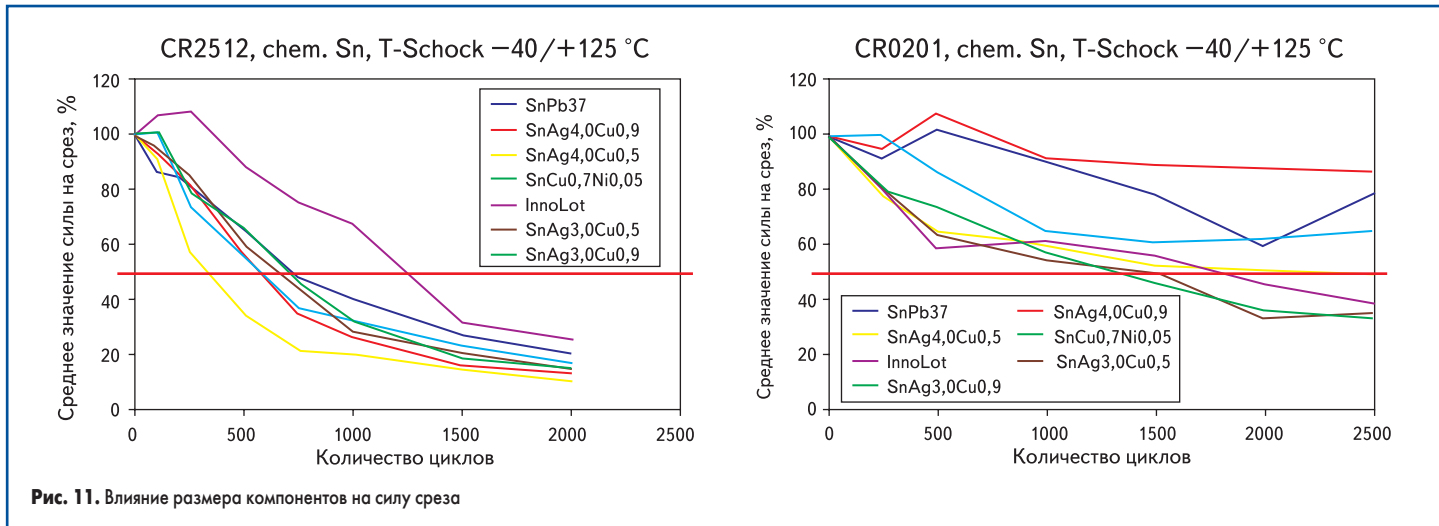


Рис. 11. Влияние размера компонентов на силу среза

ны реакции зависят от используемых материалов, температуры пайки и других параметров. Названные параметры специально изменяли преимущественно на тестовой плате 1, так же как и анализ различных объемов мест пайки за счет применения различных компонентов. Проверка качества компонентов в электронике связана чаще всего с большими термическими нагрузками и испытаниями при изменении температуры с малым и большим температурным градиентом, путем систематических исследований в проекте LiVe нужно было проверить сопоставимость различных методов испытания (рис. 10). Для тестовой платы 1 были применены следующие методы испытания:

- термошок  $-40...150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 30'10": 30'10";
- термоцикл  $-40...150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 50': 50';
- термошок  $-40...125\text{ }^{\circ}\text{C}$  30'10": 30'10";
- термоцикл  $-40...125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- быстрый термошок  $-40...125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 20'10": 15'10";
- термошок  $-20...90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 30'10": 30'10";
- термоцикл реальной эксплуатации  $-20...90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 60': 360';
- термошок  $0...80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 30'10": 30'10";
- хранение при высокой температуре (HTS)  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- хранение при высокой температуре (HTS)  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- хранение при высокой температуре (HTS)  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Паяное соединение выполняет две функции — электрический контакт и механическое соединение. Поэтому логично проанализировать срок службы электрически и/или механически. В описанном далее случае использовалась остаточная сила на срез после нагрузки термоциклированием или термошоком с помощью испытаний на срез. Для данного испы-

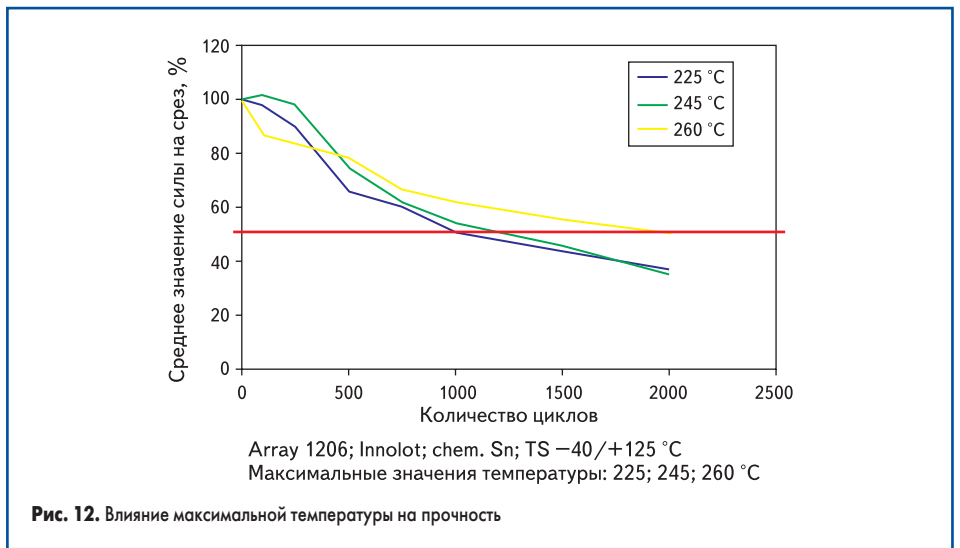


Рис. 12. Влияние максимальной температуры на прочность

тания лучше всего годятся двухполюсные компоненты. Соответствующие измерения были также проведены на компоненте формы TSOP, в котором контакты были отсоединены от компонента перед испытанием на срез.

Кривые срока службы имеют явную зависимость от размера компонентов (рис. 11). Эта зависимость обусловлена, прежде всего, размером компонентов (расстояние между контактами), а также составом припоя в зазоре паяного соединения. В качестве критерия оценки использовалось количество циклов до достижения 50% исходной силы на срез. Тем самым возможна классификация припоев, в которой припой с наибольшим количеством циклов занимает первую позицию. Любопытно, что классификация припоев изменяется для компонентов формы CR2512 и CR0201.

Подобная зависимость от формы компонентов усложняет общепринятые выводы.

В связи с этим было проведено усреднение результатов для всех компонентов. Как и ожидалось, припой InnoLot имеет наибольшую остаточную силу на срез для всех компонентов. Остальные припои расположены плотно друг к другу и имеют определенные тенденции. Для некоторых припоев заметна определенная зависимость от финишного покрытия печатных плат. Однако эта зависимость не носит систематический характер. Результаты, полученные на компоненте формы TSOP, схожи с результатами на двухполюсных компонентах. В большинстве опытов наблюдалось сравнительно небольшое положительное влияние более высоких максимальных температур на припой (рис. 12).

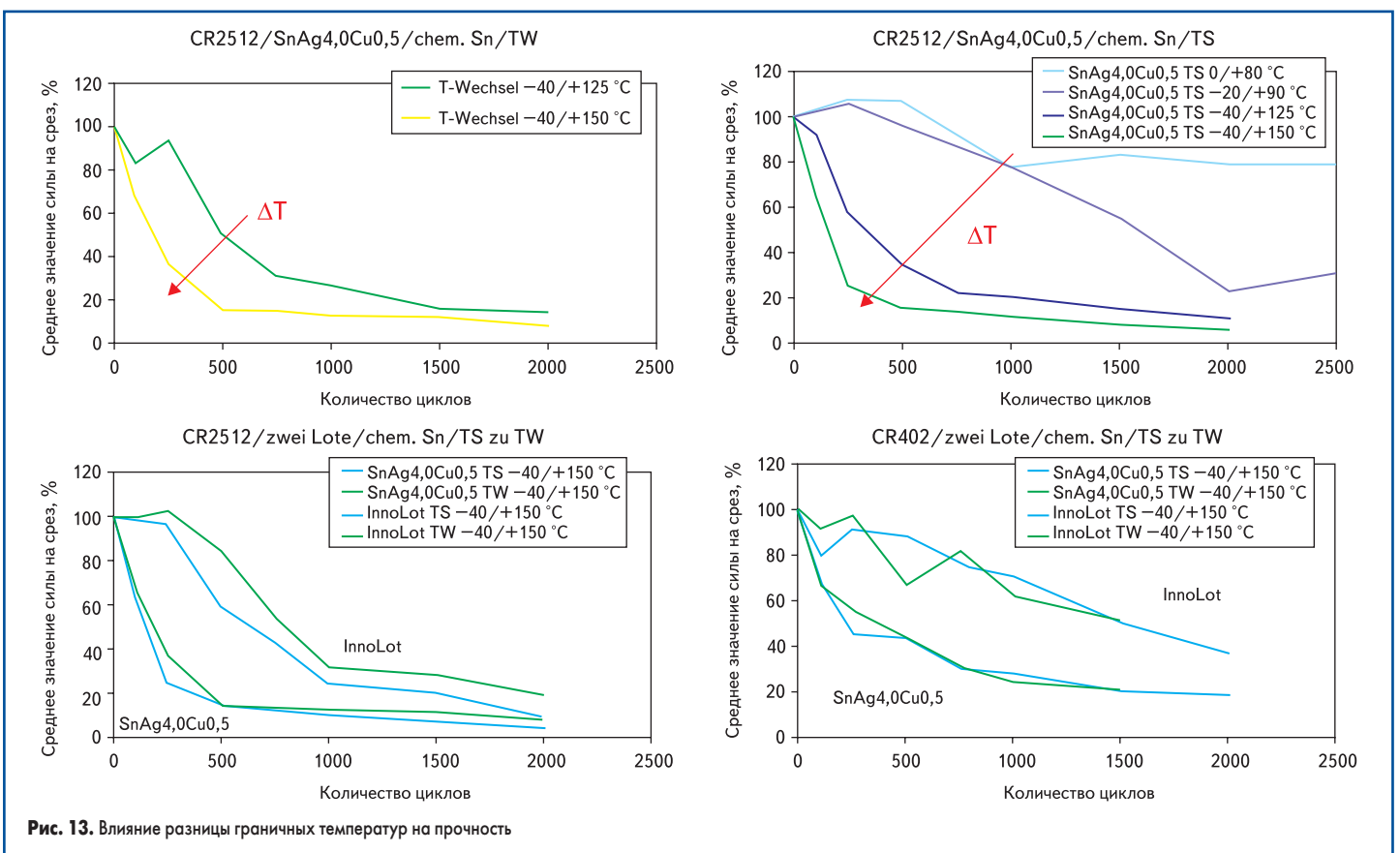


Рис. 13. Влияние разницы граничных температур на прочность

**Таблица.** Уплотнение количества данных на примере компонента CR0201

CR0201		Рабочая группа 4, оценка МТВ1 после старения			
		Суммарный отказ Электрические измерения	Относительная остаточная сила среза	Структура соединения	Сравнительная оценка длины трещины
Оценка	Припой	Не зависит	InnoLot всегда лучше На покрытии NiAu припой SAC примерно одинаково, SnPb хуже всего На покрытии хим. олово припой SnPb на втором месте, затем припой SAC, примерно одинаково	В припое InnoLot больше фаз в паяном соединении по сравнению с другими припоями, ИМФ примерно одинаково	На покрытии хим. олово припой SnPb и InnoLot примерно одинаково, SAC405 значительно хуже, на покрытии NiAu бессвинцовые припой примерно одинаково, SnPb хуже
	Металли- зация	Не зависит	Неоднозначное поведение: SnPb: Cu/OSP лучше всего InnoLot: большой разброс значений SAC: NiAu лучше всего	NiAu: во всех припоях образование фазы AuSn4 Химическое олово: нет отличий	См. припой
	Макс. температура	Не зависит	Неоднозначное поведение в зависимости от припоя и финишного покрытия	Не исследовано	Не исследовано
	Условия тестирования	Не зависит	Термошок оказывает большую нагрузку, чем термоциклирование -40...+125 °C	Не исследовано	Не исследовано
	Прочее	Очень маленькое количество отказов	Нет примечаний	Фазы AuSn в объеме паяного соединения, после старения коагуляция фаз на приграничных поверхностях	Начало трещины на позиции 2 (в середине мениска), трещин в зазоре нет

Исследования по оценке различных испытательных термоциклированием и термошоком подтверждают общие знания о том, что скорость образования и развития повреждения сильно зависят от разницы граничных температур (рис. 13). Значение максимальной температуры также оказывает влияние. Особенно интересно сравнение между термоциклированием и термошоком. Для жестко закрепленных компонентов, таких, например, как двухполюсники, термошок представляет собой большую нагрузку. Напротив, для гибко закрепленных компонентов термоциклирование представляет собой большую нагрузку. Однако различия невелики и проявляются не всегда явно.

Большое количество полученных результатов вынуждает проводить их уплотнение. Кон-

сорциум данного проекта принял решение преобразовать результаты в выводы и систематизировать в таблицы. Таблица содержит данные для компонента формы CR0201. В окончательном отчете по проекту содержатся подобные сжатые таблицы. Полученные результаты позволяют выявить определенные тенденции. Так, представляется предпочтительным сократить количество серебра в припоях SnAgCu. С другой стороны, добавкам никеля приписывается влияние на повышение прочности паяных соединений. В связи с этим было запланировано новое исследование параметров, в котором должны быть исследованы соответствующие припои.

В рамках разработки технологии было проведено большое количество квалификацион-

ных испытаний. В связи с этим желательно сокращение времени проведения отдельных испытаний с помощью ускоренных методов. Испытания термоциклированием и термошоком с результируемой термомеханической нагрузкой составляют большую часть программы испытаний и требуют больших временных затрат. Для ускорения возможны два решения — дальнейшее усиление либо температурной, либо механической нагрузки. При этом возможны различные варианты, часть которых будет исследована в следующем проекте.

*Примечание.* Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen, 2008, № 7. Германия).