

# Повышение надежности за счет миниатюризации?

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

### Часть 3. Металлургические взаимодействия и их проявления

**Уве Папе (Uwe Pape)**  
**Юрген Виллан (Jürgen Villain),**  
**профессор, д. т. н.**  
**Майк Реллиг (Mike Röllig)**

**Перевод: Андрей Новиков**

andrej.novikov@uni-rostock.de

#### Краткое описание

Данная статья содержит выборочные результаты из проекта «Модификация материала для конструкций соединений с ограничением размеров и материала в электронных модулях с высокой степенью интеграции», финансируемого Федеральным Министерством образования и науки Германии (BMBF — Bundesministerium für Bildung und Forschung). Сокращенное название проекта — LiVe (Limitierte Verbindungen — лимитированные соединения). В основном в статье представлены материалы докладов в несколько сжатой форме, прочитанных на консультационном семинаре в рамках выставки SMT/Hybrid & Packaging 2008. Доклады разделены в соответствии с 4 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 описаны металлургические взаимодействия, которые могут изменяться под влиянием миниатюризации. При этом особое внимание уделено ползучести сплавов и паяных соединений (тестовые образцы), а также рассмотрено влияние размеров образцов. В заключение более подробно описаны изменения структуры соединений под влиянием дополнительных компонентов.

#### Ползучесть сплавов и ее влияние на структуру соединений

##### *Механизмы повреждения в бессвинцовых паяных соединениях*

Важными механизмами повреждения в бессвинцовых паяных соединениях считаются зависящие от скорости пластические процессы деформации, такие как ползучесть и релаксация, которые сопровождаются эффектами рекристаллизации, укрупнением зерен и коагуляцией интерметаллических фаз

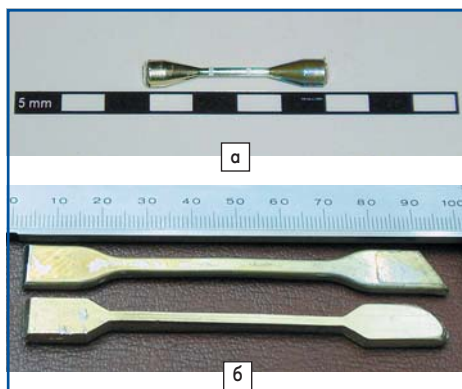
SnAg и SnCu. Их причина — в высоких значениях гомологической температуры ( $T_{\text{гомолог}} \sim 0,4$  от температуры плавления [K]) при эксплуатации материалов и соответствующих ускоренных испытаниях. Эти значения составляют для различных бессвинцовых сплавов 0,42 при  $-40$  °C и 0,93 при  $+150$  °C. Высокий процент содержания олова по сравнению с эвтектическими и близкими к эвтектическому SnPb-сплавами особенно сильно влияет на процессы повреждения SAC-сплавов (SnAgCu-сплавов). Так как миниатюризированные паяные соединения, например, компонента CR0201, состоят из кристаллитов (от одного до четырех), на анизотропию олова следует обращать больше внимания, чем в случае более крупных паяных соединений. В то же время условия отверждения и количество растворенных дополнительных компонентов, таких как никель, висмут, индий, цинк или сурьма, из металлизаций субстратов и электронных компонентов при больших и маленьких паяных соединениях различаются. Это проявляется в разных структурах соединений, например, образовании интерметаллических фаз (ИМФ) после изготовления и при эксплуатации паяных соединений, и в связи с этим — в их различных механических свойствах. В зависимости от соответствующей концентрации материала в паяном материале образуются выделения, которые остаются в матрице олова в виде инкогерентных или семикогерентных частиц. При этом в  $\beta$ -олове наряду с макроскопическими остаются также микроскопические частицы с размером от 10 до 320 нм. Количество частиц оказывает значительное влияние на подвижность дислокаций и, как следствие, на пластическую деформацию в зависимости от количества кристаллитов в паяном соединении (влияние размера). Эвтектические SnPb-припои обладают суперпластичностью по сравнению с бессвинцовыми SAC-припоями, в то время как последние относятся к сплавам с дисперсионным отверждением.

Описанные факторы обуславливают сложность долговременного поведения бессвинцовых паяных соединений, причем для описания надежности будущих миниатюризированных паяных соединений необходимо также учитывать их размер.

**Ползучесть SAC-сплавов**
**Испытания для определения ползучести**

Наиболее распространенный и методически наиболее простой вариант для определения свойств ползучести паяльных материалов заключается в измерении характеристик растяжения образцов в зависимости от времени. Для определения влияния размера использовались образцы для испытания на растяжение двух разных размеров:

- бездефектный литой миниатюрный образец для испытания на растяжение (рис. 1а);
- бездефектный литой образец с двумя выступами для фиксации (рис. 1б).



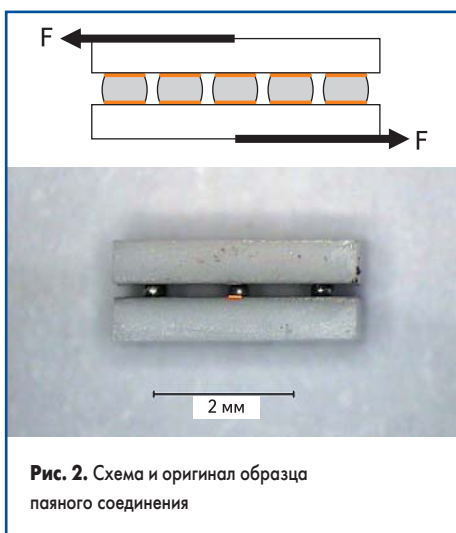
**Рис. 1.** Образцы для испытаний на растяжение и ползучесть из чистого паяльного материала:  
 а) миниатюрный образец для испытания на растяжение (источник: Университет прикладных наук, Аугсбург);  
 б) образец с двумя зажимами (источник: Технический Университет, Дрезден)

Установка для испытания на растяжение образцов с двумя выступами сконструирована таким образом, что в ходе испытания на растяжение образцы нагружаются вдоль оси, а поперечная нагрузка сведена до минимума. Электродинамическая измерительная система фиксирует деформацию образца в зависимости от времени с точностью  $\Delta s = \pm 100$  нм. Измерения образцов припоя могут проводиться в температурном шкафу при температуре от 20 до 200 °С. Для обеспечения стабильной температуры с  $\Delta T = \pm 0,5$  К возможен нагрев зажимов для образцов. Поэтому области упругой деформации, первой и второй стадий ползучести могут быть отображены с достаточно хорошим разрешением.

Для определения влияния размера на свойства ползучести паяльных материалов были сконструированы миниатюрные образцы для испытаний на растяжение с объемом припоя, который примерно соответствует объему припоя компонентов формы CR2512. Испытания на ползучесть проводились в регулируемой конвекционной печи ( $\Delta T = \pm 1$  °С) при различных нагрузках и значениях температуры (80...220 °С). Тем самым обеспечивалась одинаковая температура приспособления для испытаний и образцов. Удлинение образцов измерялось с помощью лазерного экстензиометра с точностью около 50 нм. Для определения оригинальной кривой пол-

зучести проводились испытания при трех различных нагрузках и трех значениях температуры. Для каждого значения температуры и нагрузки использовалось от трех до шести образцов. Значения температур были выбраны таким образом, что тестирование проходило при примерно одинаковых гомологических температурах (0,65; 0,8; 0,95) для возможности последующего сравнения результатов на основании одинаковых моделей ползучести. С помощью математического выражения для сдвига температуры и времени, применение которого было подтверждено для припоев, могут быть определены коэффициенты сдвига время-температура и время-напряжение на основании смещения ползучести. Поэтому возможно построение оригинальных кривых ползучести для 10 000 и 100 000 часов исходя из измерений до 100 часов, что позволяет описать долгосрочное поведение до разрушения.

С помощью изучения характеристик ползучести массивных образцов могут быть проведены сравнение и оценка различных припоев. Эффекты растворения, которые возникают во время процесса пайки компонента на печатной плате и ведут к изменению состава припоя и структуры, в данном случае не учитывались. Для целенаправленной характеристики состояния паяльного материала в качестве соединительного элемента между компонентом и печатной платой необходимо проводить механическое измерение непосредственно паяных соединений, нагруженных на срез и отличающихся в размере. Образец припоя для испытания на срез (образец паяного соединения, ОПС) состоит из двух керамических подложек, спаянных друг с другом пятью паяными соединениями (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема и оригинал образца паяного соединения

Установка для испытания предназначена для механической характеристики паяных соединений с диаметром  $\geq 200$  мкм. Введение срезающего усилия в паяном соединении ведет к деформации припоя. В случае если деформация происходит в области первой и второй стадий ползучести, в припое возникают очень маленькие повреждения, так как в отличие от третьей стадии ползучести не образуются пустоты и микротрещины. Согласно этому срезающее усилие может нагружать паяное соединение циклически с изме-

нением направления. Из этого в свою очередь следует, что в одном образце припоя может быть проведено несколько испытаний на ползучесть с различным уровнем нагрузки.

Это дает основания:

- для сравнения паяных соединений с различным составом друг с другом;
- для изучения влияния металлизации поверхности контактных площадок;
- для выведения полных функций ползучести для вычислений с помощью метода конечных элементов.

Для быстрой оценки характеристик ползучести паяного соединения, то есть для определения сопротивления ползучести, применялись специальные образцы с четырьмя паяными соединениями для испытания на кручение в Институте надежности и микроинтеграции им. Фраунгофера (Fraunhofer IZM). В ходе испытаний с кратковременной и долговременной нагрузкой все четыре паяных соединения нагружаются одновременно. Благодаря этому возможно, несмотря на достижение температуры распайки и последующего отделения (разрыва) двух паяных соединений, проводить анализ структуры двух других соединений. Исследование долговременных свойств паяных соединений проводилось с помощью модифицированного реометра марки UDS 200 фирмы Raag. Образцы для испытаний могут быть подвергнуты как постоянной, так и переменной нагрузке (максимальный момент кручения составляет 150 мН·м).

**Ползучесть макрообразцов**

В рамках проекта были изучены характеристики ползучести образцов для испытания на растяжение из припоев SnAgCu и InnoLot с различным размером и, следовательно, с различным объемом. В таблице 1 представлены паяльные материалы для испытаний (припоя SAC, InnoLot).

**Таблица 1.** Массивные образцы для испытания на ползучесть

Сплав	Миниатюрный образец для испытаний на растяжение (Университет прикладных наук, Аугсбург)	Образец для испытаний на растяжение с двумя выступами (Технический Университет, Дрезден)
SnAg2		x
SnAg3		x
SnAg3,5	x	
SnAg4		x
SnAg2Cu0,5		x
SnAg2Cu1,2	x	
SnAg2,7Cu0,4	x	
SnAg3Cu0,5	x	
SnAg3Cu0,9	x	
SnAg3Cu1,2	x	
SnAg4Cu0,5	x	
SnAg4Cu1,2	x	
InnoLot (SnAg3,8Cu0,7Bi3Sb1,5Ni0,2)	x	x

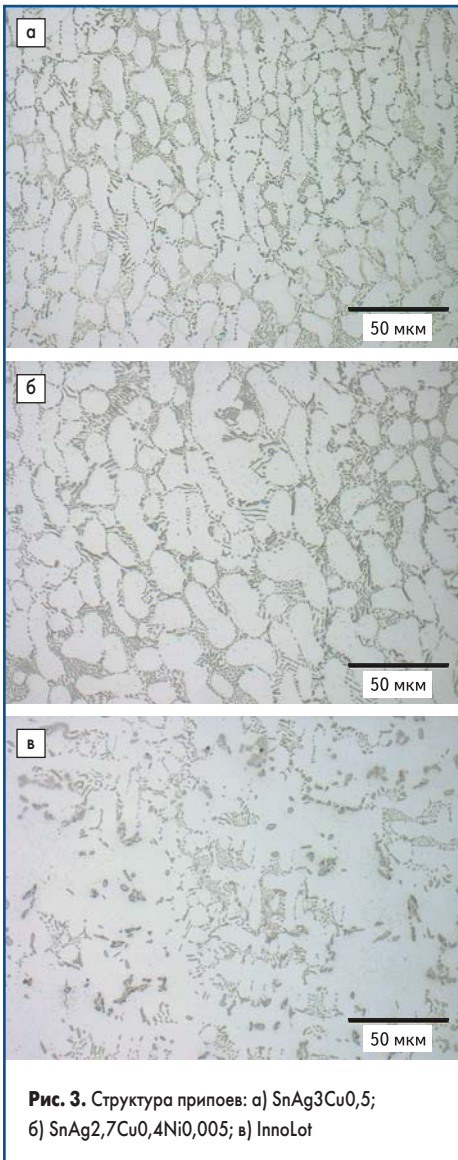


Рис. 3. Структура припоев: а) SnAg3Cu0,5; б) SnAg2,7Cu0,4Ni0,005; в) InnoLot

На рис. 3 в качестве примера представлены соответствующие структуры паяных соединений. В зависимости от содержания серебра и меди, наряду с дендритами из β-олова и эвтектики из β-олова и фаз Ag<sub>3</sub>Sn и Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, в соединениях находятся также первичные фазы Ag<sub>3</sub>Sn и Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>. Доля интерметаллических фаз в припое InnoLot значительно выше, и за счет содержания олова и сурьмы одновременно происходит напластование от-

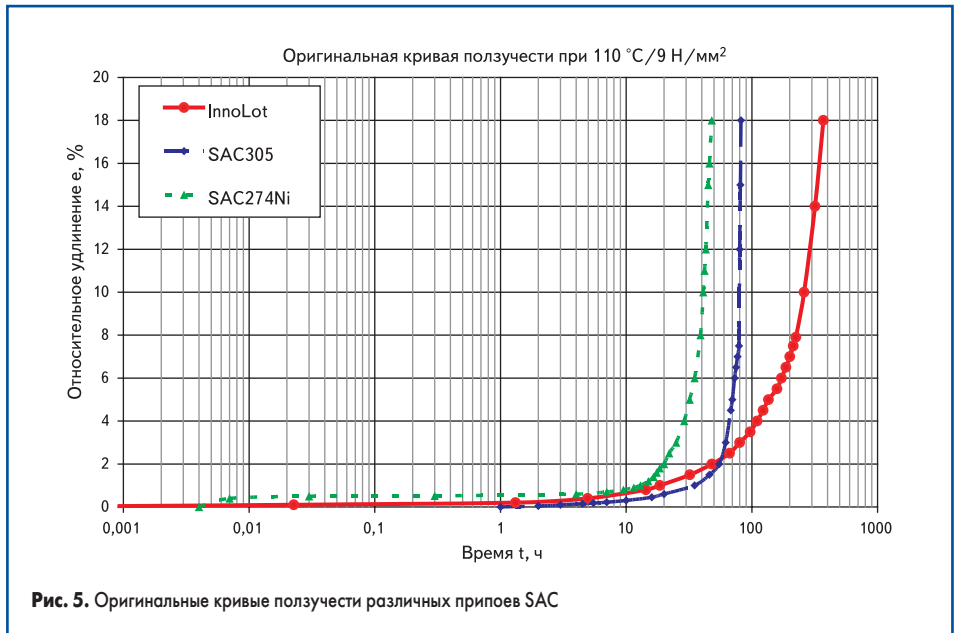


Рис. 5. Оригинальные кривые ползучести различных припоев SAC

вержденных смешанных кристаллов и отдельных частиц.

Сравнение результатов испытания на ползучесть припоя InnoLot показано на рис. 4. Экспоненты напряжения в данном случае не сильно отличаются друг от друга. Однако можно заметить зависимость от размера образцов.

При рассмотрении ряда припоев SnAg<sub>2,7</sub>Cu<sub>0,4</sub>Ni<sub>0,05</sub>, SnAg<sub>3</sub>Cu<sub>0,5</sub> и InnoLot оригинальные кривые ползучести сдвигаются в сторону большей продолжительности, то есть сопротивление ползучести увеличивается во время всего процесса ползучести до разрыва. Соответствующая оригинальная кривая ползучести для эвтектического припоя SnPb должна располагаться слева от кривой припоя SnAgCuNi. Смещение по временной оси между припоями SnAg<sub>2,7</sub>Cu<sub>0,4</sub>Ni<sub>0,05</sub> и SnAg<sub>3</sub>Cu<sub>0,5</sub> происходит с фактором 2. Припой InnoLot, который обладает наибольшим сопротивлением ползучести, имеет сдвиг с фактором около 10 в сторону большей продолжительности.

**Ползучесть паяных соединений**

Исходный сплав припоя постоянно взаимодействует с поверхностью металлизации кон-

тактной площадки. В связи с этим необходимо всегда отдавать предпочтение образцам с двумя зажимами для характеристики паяных соединений. Особенно это касается случая, когда модели поведения материала базируются на результатах измерений. Основой последующих измерений служат паяные соединения с диаметром контактных площадок 200 и 400 мкм. SAC-припой в данных испытаниях содержит серебро (от 1,3 до 3,5 вес. %), медь (от 0,3 до 0,75 вес. %), а также небольшое количество никеля (0,05 вес. %) и фосфор (0,001 вес. %). Металлизация контактных площадок — медь/хим. олово или медь/хим. никель/хим. золото.

Влияние серебра проявляется в том, что чем больше серебра содержится в припое, тем выше сопротивляемость припоя пластической деформации и тем выше коэффициент напряжения (рис. 6). В припое серебро образует с оловом фазы Ag<sub>3</sub>Sn, которые выделяются в матрице припоя в виде отдельных частиц (отверждение частиц). Количество частиц оказывает влияние на чувствительность к напряжению. Чем больше серебра растворено в припое, тем чувствительнее припой реагирует на изменение механического напряжения. Это означает, что коэффициент напряжения *n* возрастает.

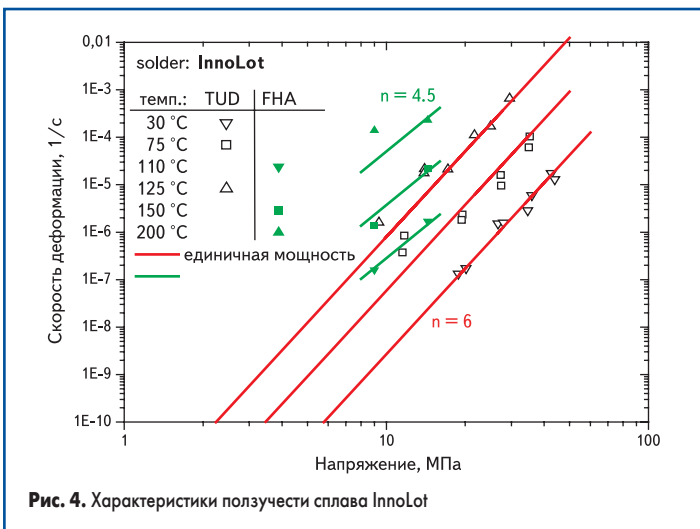


Рис. 4. Характеристики ползучести сплава InnoLot

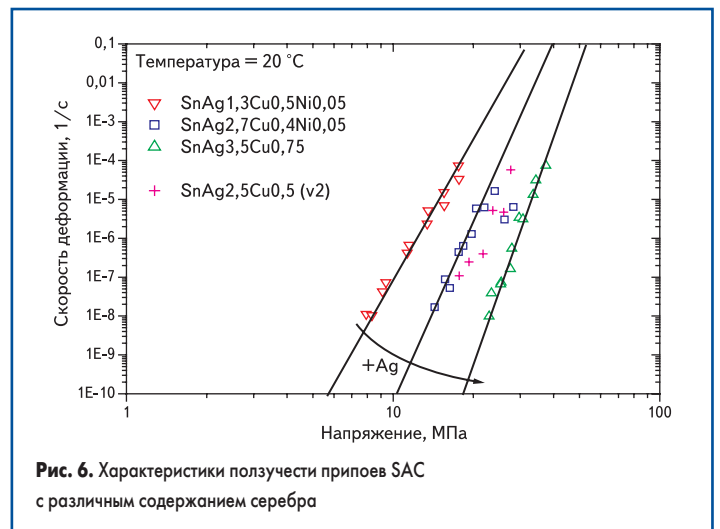


Рис. 6. Характеристики ползучести припоев SAC с различным содержанием серебра

**Таблица 2.** Влияние компонентов сплавов в SAC-припоях ( $Ag \leq 3$  вес. %,  $Cu \leq 1,2$  вес. %) на характеристики ползучести

Компонент сплава	Воздействие
	Миниатюрный образец для испытания на растяжение (массивный материал) (Университет прикладных наук, Аугсбург – УПНА) Паяные макросоединения (Институт надежности и микроинтеграции им. Фраунгофера, Берлин – ИНМ) Паяные микросоединения (Технический Университет, Дрезден – ТУД)
Cu	Чем выше содержание меди, тем меньше различий в характеристике ползучести (УПНА, ИНМ) Содержание меди в области 0–0,5 вес. % значительно повышает сопротивление ползучести, содержание меди в области 0,5–1,2 вес. % оказывает незначительное влияние на сопротивление ползучести (ТУД)
Ag	Возрастающее содержание серебра (0–3,5 вес. %) повышает сопротивление ползучести и чувствительность к напряжению (УПНА, ИНМ, ТУД); при более высоком содержании серебра добавки никеля не ведут к повышению сопротивления ползучести (УПНА, ИНМ)
Ni	Добавки никеля повышают сопротивление ползучести, в припоях SnCu ведут к большему повышению сопротивления ползучести по сравнению с SAC-припоями (УПНА, ИНМ); никель располагается в фазах $Cu_6Sn_5$ Добавки никеля при содержании серебра ( $> 2,7$ вес. %) не вызывают заметного повышения сопротивления ползучести. Растворение никеля влечет за собой незначительное повышение сопротивления ползучести и чувствительности к напряжению (ТУД)
Au	Растворение золота ведет к повышению сопротивления ползучести (ТУД)
P	Повышение сопротивления ползучести при содержании серебра 2,7 вес. %; повышение сопротивления ползучести при добавке никеля и небольшом содержании серебра, уменьшение сопротивления ползучести в случае отсутствия в припое добавок никеля (УПНА, ИНМ). Не влияет на характеристики ползучести (ТУД)

В таблице 2 представлено влияние протестированных компонентов сплавов на характеристики ползучести сплавов SAC в соответствии с тенденцией.

С точки зрения оптимизированного SAC-припоя результаты данных исследований характеристик ползучести с различными легирующими компонентами, которые могут быть присоединены из металлизации контактной площадки и компонента, можно сформулировать следующим образом:

- Содержание меди после всех процессов пайки должно находиться в пределах 0,5–1,2 вес. % для того, чтобы все паяные соединения обладали одинаковым сопротивлением ползучести. Содержание меди в исходном припое должно составлять 0,5 вес. % для того, чтобы после легирования на контактных площадках медь/олово или OSP не образовывались большие первичные фазы  $Cu_6Sn_5$ .
- Содержание серебра должно быть высоким, но не доэвтектическим, то есть около 2,5–2,7 вес. %, чтобы предотвратить выделение больших первичных фаз  $Ag_3Sn$ .
- Эвтектические фазы  $Cu_6Sn_5$  и  $Ag_3Sn$  необходимы для обеспечения определенного отверждения частиц.
- Никель в качестве легирующего элемента необходим для образования многоэлементных интерметаллических фаз и, по-видимому, служит их температурной стабильности.
- Фосфор, скорее всего, оказывает положительное влияние на сопротивление ползучести.

### Влияние размера на ползучесть припоев SnAgCu

Для оценки влияния размера на ползучесть было проведено сравнение результатов испытаний массивного материала (объем образцов 600 мм<sup>3</sup>), испытаний массивных миниатюрных образцов на растяжение (объем образцов 4,9 мм<sup>3</sup>) и паяных микросоединений (объем образцов 0,014 мм<sup>3</sup>). Эти результаты могут быть перенесены на реальные паяные соединения в соответствии с тенденцией, так как во время испытаний термоциклированием трещины возникают, прежде всего, в паяльном материале. Сравнение проводилось с учетом следующих условий:

- одинаковые припои;
  - одинаковые значения напряжения (9 Н/мм<sup>2</sup>);
  - сравнимые области температур;
  - трещины проходят в объеме припоя.
- Были установлены следующие тенденции:
- При уменьшении объема испытываемого припоя возникает температурная зависимость коэффициента напряжения  $n$ .
  - При уменьшении объема испытываемого припоя возникает температурная зависимость энергии активации, и ее значение резко возрастает.
  - Влияние содержания серебра на коэффициент напряжения в микропаяных соединениях проявляется в возрастании коэффициента при увеличении содержания серебра (имеет силу для 0–4 вес. % серебра).

То есть может быть показано, что размер образцов оказывает влияние на характеристики ползучести. Однако необходимо дальнейшего расширения базы данных.

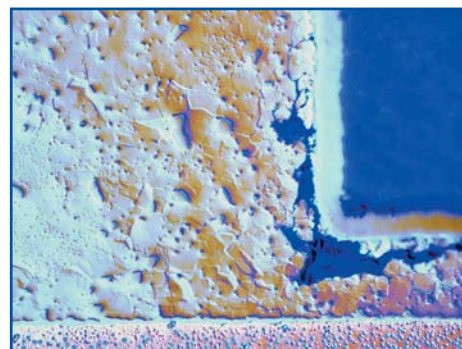
### Изменения структуры соединения во время термоциклирования

Металлографические исследования были проведены в первую очередь после испытательного термошоком: –40...125 °С на 1000 циклов на компонентах CR0201 и CR1206 тестовой печатной платы 1 с металлизацией контактных площадок медь/хим. олово или медь/хим. никель/хим. золото. Далее представлено описание существенных изменений структуры.

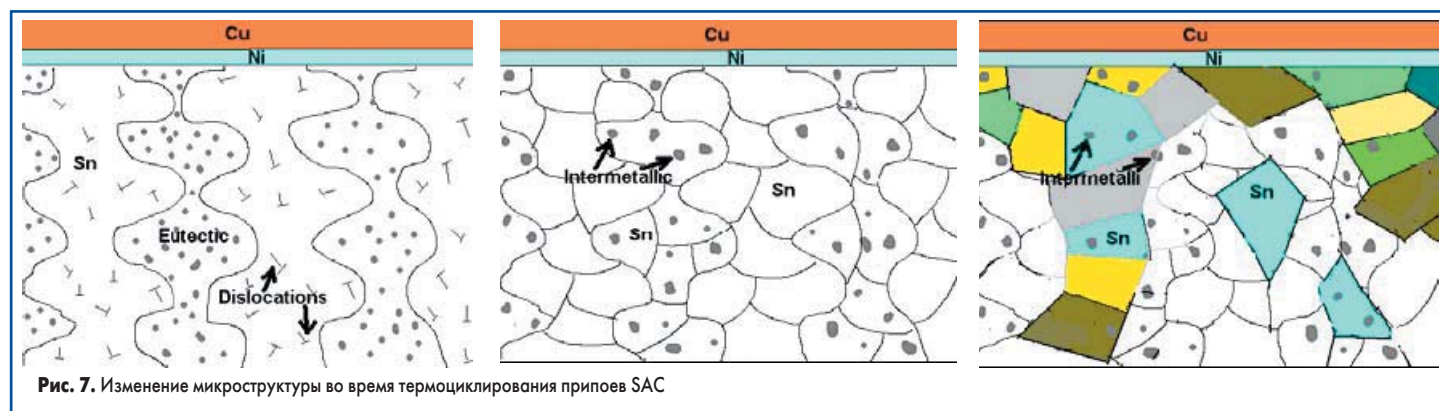
#### Рекристаллизация

За счет имеющихся механических напряжений (причина: различия в температурных коэффициентах линейного расширения контактируемых материалов) и дополнительного притока энергии (термоциклирование, хранение при высокой температуре) поддерживается и ускоряется процесс рекристаллизации, который ведет к тому, что вблизи трещин и в узких зазорах находится рекристаллизованная структура, а в отдалении от трещин структура соединения может быть дендритической (рис. 7).

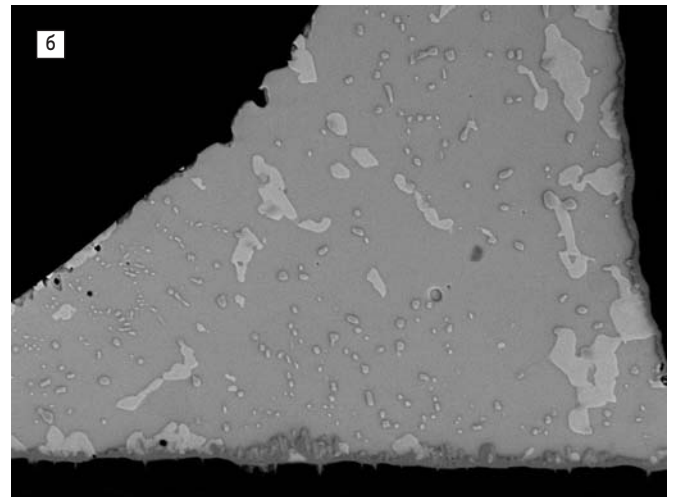
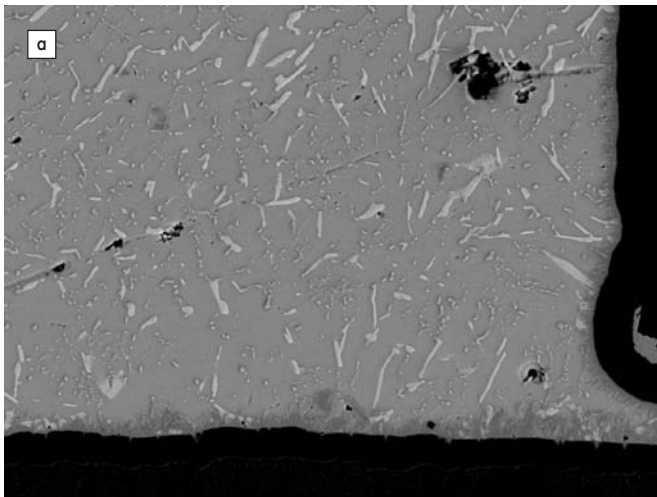
Данный процесс рекристаллизации проявляется, прежде всего, после испытания термошоком, однако он может быть зафиксирован и в исходном состоянии в узких зазорах между компонентом и контактной площадкой печатной платы. После пайки в образцах с финишным покрытием NiAu процесс рекристаллизации был зафиксирован чаще. На примере компонента формы 1206 (рис. 8) показано из-



**Рис. 8.** Изменение за счет рекристаллизации (CR1206, поляризованный свет, SnAg4Cu0,5)



**Рис. 7.** Изменение микроструктуры во время термоциклирования припоев SAC



**Рис. 9.** Коагуляция фаз  $AuSn_4$  в компоненте формы CR0201 (припой SAC; металлизация контактной площадки печатной платы: медь/хим. никель/хим. золото): а) до нагрузки; б) после нагрузки термоциклированием ( $-40...+125\text{ }^\circ\text{C}$ ; 1000 циклов)

менение структуры вследствие термоциклирования.

**Фазы и толщина фаз (после термошока  $-40...125\text{ }^\circ\text{C}$ ; 500, 1000 и 2000 циклов)**

Количество растворенного никеля в фазах  $Cu_6Sn_5$  на границе контактной площадки печатной платы и припоя возрастает от 10 до 40% при увеличении притока энергии. В зависимости от привнесенной общей энергии в фазах NiSn также частично растворяется золото.

В компонентах формы CR0201 и CR1206 нагрузка термошоком ведет к тому, что фазы становятся более плоскими и округленными, исчезает их игольчатость, и отдельные большие фазы перемещаются внутрь объема соединения. Исключение составляет припой InnoLot, структура которого лишь несущественно изменяется при описанных условиях, и слой интерметаллических фаз становится толще в компоненте формы CR1206. Твердость интерметаллических фаз несущественно изменяется после испытания термошоком, термоциклированием и после хранения при повышенной температуре. Описанные изменения химического состава фаз  $Cu_6Sn_5$ , скорее всего, не могут быть зафиксированы с помощью наноиндентирования.

**Коагуляция фаз и их измененный химический состав**

Для небольшого объема припоя (компонент формы CR0201) характерна сильная тенденция к коагуляции фаз, что особенно явно может быть показано на примере первичных фаз  $AuSn_4$  (рис. 9). Эвтектические фазы  $Cu_6Sn_5$  и  $Ag_3Sn$  также коагулируют при дальнейшем притоке энергии за счет, например, термоциклирования или хранения при повышенной температуре.

Данная коагуляция эвтектических и первичных интерметаллических фаз и рекристаллизация кристаллов олова — важные механизмы для понимания возникающих в ходе термоциклирования механизмов отказов. На рис. 8 показана структура паяного соединения из при-

поя  $SnAg_4Cu_{0,5}$  компонента формы CR1206 после испытания термошоком ( $-40...+125\text{ }^\circ\text{C}$ ). Вокруг трещины явно заметны многоугольные кристаллы  $\beta$ -олова (высокая концентрация напряжений), а на расстоянии около 80–100 мкм от трещины видна изначальная дендритная структура отвержденного припоя (слева). Одновременно произошла коагуляция фаз. Из этого следует, что после нагрузки термоциклированием паяное соединение имеет сложную структуру, которая изменяется в зависимости от времени.

**Механизм повреждения SAC-припоев при процессах пластической деформации в зависимости от ее скорости**

Как показало исследование трещин, для всех припоев и металлизаций и описанных условий испытаний имеет силу утверждение, что трещины возникают, прежде всего, в объеме припоя, очень редко между припоем и границами поверхностями интерметаллических фаз и практически никогда — в самих интерметаллических фазах либо на границе интерметаллической фазы и контактной площадки или металлизации компонента. Трещины возникают всегда в области специфических пиков напряжения, которые локально перемещаются в зависимости от формы компонента и изначального имеющегося повреждения. В данных областях происходит рекристаллизация олова, и из дендритной структуры образуются многоугольные зерна.

Трещины распространяются внутри рекристаллизованных кристаллов олова (транскристаллический или чаще — межкристаллический рост трещины) и на границе кристалл олова/интерметаллическая фаза, там, где расположены различные «не подходящие друг к другу» виды кристаллов ( $Cu_6Sn_5$  — моноклинный,  $Ag_3Sn$  — гексагональный,  $Ni_3Sn_4$  — моноклинный, Sn — тетрагональный). За счет небольшого сцепления между этими фазами рост трещины в этом месте облегчен по сравнению с однородным кристаллом. Эти интерметал-

лические фазы представляют собой, как правило, коагулированные эвтектические фазы. Чем выше степень коагуляции, тем крупнее эти фазы и больше расстояние между ними. Тем самым увеличивается путь трещины в олове. При растворении в олове прочих элементов, ведущих к отверждению смешанных кристаллов, таких как, например, сурьма или висмут в припое InnoLot, скорость распространения трещины уменьшается, и снижение прочности, связанное, например, с нагрузкой термоциклированием, проявляется позже.

В случае препятствия коагуляции фаз за счет примесных элементов они расположены более равномерно, а также сокращается продолжительность отрезков интерметаллическая фаза/кристаллит олова с небольшой адгезией и высокой скоростью распространения трещин. Тогда распространение трещин определяется сопротивлением данному эффекту в олове. В связи с этим во всех исследованных системах припой InnoLot имеет небольшое сокращение усилия на срез. Образующиеся фазы AuSn на металлизации Cu/Ni/Au служат препятствиями для распространения трещин, в случае если эти фазы не очень большие.

**Выводы по металлургическим взаимодействиям**

Микроструктура припоя или паяного соединения в значительной степени определяет характеристики ползучести. В соответствии с тенденцией можно сказать, что мелкозернистая структура, дисперсионное упрочнение за счет равномерно распределенных вторичных и третичных фаз SnCu, SnAg и SnNi, упрочнение смешанных кристаллов за счет растворенных примесных атомов, подавление коагуляции фаз и значительно задержанная рекристаллизация повышают сопротивление ползучести. С этим связаны более позднее зарождение трещины и ее сдержанный рост. Данная модель может быть экспериментально подтверждена с помощью паяных соединений из припоев SnAgCu.