

# Увеличение надежности пайки в условиях повышения температур

**В последнее время производители автомобильной электронной аппаратуры часто сталкиваются с проблемой сохранения термомеханической надежности паяных соединений. В первую очередь из-за того, что увеличивается жесткость условий эксплуатации, ведь в современных транспортных средствах электронные модули управления располагаются буквально под капотом. К тому же наблюдается тенденция уменьшения размеров и веса устройств вкпе с требованиями автопроизводителей увеличить гарантийный срок службы. В статье рассмотрен процесс создания нового сплава для использования его в жестких условиях (повышение температуры, вибрации и т. п.), приведены результаты его проверки на смачиваемость, ползучесть и надежность соединения.**

Перевод:  
Ольга Очур

Главная особенность жестких условий эксплуатации состоит в том, что электронные устройства, находящиеся «под капотом» транспортных средств (в двигателях, коробках передач, силовых передачах, шасси), большую часть времени функционируют при повышенных температурах, нередко сопровождающихся высоким уровнем вибрации. У стандартных бессвинцовых сплавов на основе SAC (Sn-Ag-Cu) точка плавления выше, и при высоких рабочих температурах они сравнимы с использовавшимися ранее более прочными оловянно-свинцовыми сплавами, но имеют недостаточное для более жестких условий эксплуатации сопротивление ползучести.

## Свинцовые сплавы

Выбор бессвинцового сплава — вопрос, который уже долгое время обсуждается производителями электроники. Отрасль, выпускающая бытовую электронную технику, после вынужденного перехода на бессвинцовые сплавы накопила немало знаний и опыта. Это поддерживалось и многочисленными исследованиями по материаловедению, а также внесением необходимых улучшений в технологическое оборудование. Подавляющее большинство исследований и разработок по материалам для пайки сфокусировано в основном на совершенствовании характеристик и на получаемых экономических преимуществах.

Данные исследования и разработки, проводившиеся в целях повышения объемов производства и снижения затрат, стали результатом принятия директивы ЕС по ограничению применения опасных веществ RoHS. При выполнении таких исследований по бессвинцовым сплавам в автомобильной электронике было обнаружено, что рабочие температуры эксплуатации данных модулей значительно увеличились. Поэтому проблема повышения надежности сплавов при эксплуатации в жестких условиях, где не могут

использоваться «стандартные» сплавы на основе SAC, приобрела особую актуальность.

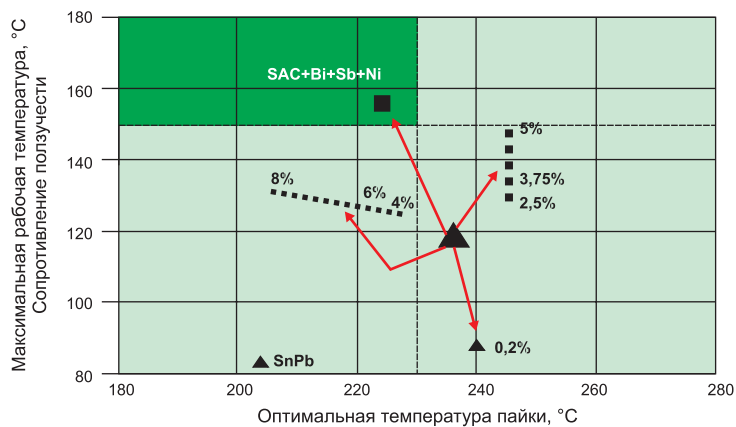
Необходима разработка новых сплавов, удовлетворяющих следующим условиям:

- 1) без содержания свинца;
- 2) экономическая целесообразность для массового производства;
- 3) возможность получения надежных соединений в условиях высоких температур и вибраций, имеющих качество лучше, чем у соединений с использованием сплавов на основе SAC.

Для этих целей в Германии была собрана рабочая группа, состоящая из представителей нескольких компаний-производителей и академических учреждений.

Для того чтобы в дальнейшем использовать эти сплавы в производстве автомобильной электроники, их создание должно отвечать определенным требованиям. Вот почему для нового сплава были сформулированы следующие технические условия, которым он должен удовлетворять:

1. Без содержания свинца: хотя жесткого требования по ограничению использования свинца в автомобильной электронике нет, было решено исключить свинец из сплавов, так как в будущем законодательство может измениться.
2. Рабочая температура +150 °С: это требование исключает применение не только легкоплавких оловянно-свинцовых сплавов, но и стандартных оловянно-серебряных, оловянно-медных и оловянно-серебряно-медных соединений.
3. Выдерживание 1000 циклов повышения и понижения температур (термоциклов) с перепадами от -55 до +150 °С, что говорит о возможности использования сплава в различных электрических компонентах без сбоев.
4. Сравнимая стоимость и токсичность: сплав должен иметь цену, сравнимую с уже существующим оловянно-серебряно-медным сплавом. Уровень токсичности также должен быть приемлемым и удов-



**Рис. 1.** Зависимость значений максимальной рабочей температуры и температуры пайки от добавления элементов в сплав

**Таблица.** Влияние температуры пайки и рабочей температуры

	Минимальная температура пайки, °C	Максимальная рабочая температура, °C
SAC387	+235	+115
+ 4Bi	+228	+128
+ 6Bi	+219	+130
+ 8Bi	+212	+132
+ 2,5Sb	+245	+130
+ 3,75Sb	+245	+135
+ 5Sb	+245	+150
+ 0,2Ni	+240	+140

температуры, и наибольший эффект наблюдается при добавлении сурьмы. Но сурьма и никель производят нежелательный эффект, выражающийся в повышении температуры перехода в жидкую фазу, то есть для пайки понадобится более высокая минимальная температура. В качестве противодействия в сплавы на основе олова можно добавить висмут, это уменьшит температуру перехода сплава в твердое состояние, что означает, что стадия смачивания начнется раньше. Данный эффект снижения температуры перехода в твердое состояние после добавления висмута уже применялся в других разработках, например для пайки волной недорогих термочувствительных ламинатов FR-2, используемых для бытовой электроники.

Затем необходимо подобрать оптимальную концентрацию трех добавленных элементов. Конечная композиция — сплав SAC387 с добавлением 3% висмута (Bi), 1,4% сурьмы (Sb) и 0,15% никеля (Ni). Данная комбинация выдерживает рабочие температуры  $\geq 150$  °C и имеет потенциальную минимальную температуру пайки +225 °C. Данный сплав получил название InnoLot.

### Характеристики ползучести

Далее необходимо исследовать характеристики созданного сплава. На рис. 2 и 3 показана скорость ползучести сплава в зависимости от температуры окружающей среды и при максимальной температуре +150 °C. Наблюдается увеличение устойчивости к ползучести сплава InnoLot, что хорошо влияет на надежность паяных соединений в условиях постоянных повышений и спадов температуры и вибраций. В более свежих исследованиях на ползучесть, проведенных в Оксфордском университете с использованием других методов определения твердости этого сплава, были получены такие же результаты.

### Смачиваемость

В дополнение к термомеханическим исследованиям необходимо, чтобы сплав мог использоваться в процессах сборки в крупных производствах с большим выходом годных, то есть необходимо провести контроль паяемости сплава.

Один из ключевых показателей — поведение сплава при смачиваемости по сравнению с основным сплавом SAC387. Добавление

летворять соответствующим директивам (настоящим и возможным в будущем).

Разработка сплава была начата с анализа следующих стандартных сплавов:

1. Олово-серебро-медь (SAC): показывает лучший предел текучести и используется многими производителями, так как обеспечивает хорошую надежность соединения в различных областях применения. Данный сплав обычно содержит 3–4% серебра, при содержании 3,8% серебра и 0,7% меди образуется эвтектика.
2. Легкоплавкий сплав на основе олово-медь: имеет более дешевое сырье для изготовления, чем сплавы SAC. Обычный оловянно-медный сплав показывает меньший, чем у сплавов SAC, предел текучести, а также меньшую надежность.

Некоторые исследования показывают, что добавление в серебросодержащие сплавы интерметаллического соединения  $Ag_3Sn$  обеспечивает значительное улучшение прочности сплава, особенно в условиях тепловых циклов.

### Кандидаты в элементы для сплава

Разработка и создание сплава происходит в несколько этапов, и первый из них — оценка выбранного сплава и потенциального состава его основы с точки зрения принятых требований и ограничений. К моменту разработки нового сплава в большинстве существующих продуктов использовались сплавы на основе олово-свинец и олово-свинец-серебро. Но они не удовлетворяют двум первым условиям: сплав содержит свинец и рабочая температура меньше +150 °C. Сплав олово-серебро-медь имеет рабочую температуру +120 °C, рассчитанную с помощью метода Коффина — Мэнсона. Вычисления проводились по ожидаемому числу циклов до начала разрушения, в качестве основного металла был взят сплав олово-свинец, при этом максимальная рабочая температура составила +85 °C (такое значение максимальной температуры считается безопасным для этого сплава).

Далее задача состояла в том, чтобы найти способы изменить сплав SAC для применения в сборках печатных плат, при этом должны выполняться перечисленные выше условия.

Характеристики полученных новых сплавов необходимо проверить опытным путем. Основная цель вносимых в сплав изменений — увеличение сопротивления к ползучести, так как при повышенных температурах низкое сопротивление к ползучести ограничивает срок жизни паяного соединения. Для этого использовался известный метод, основанный на упрочнении твердого раствора или закалке сплава. В качестве добавки к базе олово-серебро-медь рассматривались следующие элементы:

1. Индий (In): может снизить кривую ликвидуса сплава, однако его стоимость не удовлетворяет условию (4), поэтому индий был отвергнут.
2. Никель (Ni): обеспечивает дисперсионное упрочнение с помощью образования интерметаллической фазы.
3. Висмут (Bi): обеспечивает упрочнение твердого раствора и снижает точку плавления систем на основе олова.
4. Сурьма (Sb): обеспечивает упрочнение твердого раствора, но увеличивает точку плавления систем на основе олова.

### Создание и оптимизация состава

После того как дополнительные элементы сплава определены, можно начать его создание, оптимизацию состава и проверку. Тестовый образец был сформирован так, чтобы оценить влияние элементов: висмута (Bi), сурьмы (Sb) или никеля (Ni), после добавления разных объемов каждого элемента в систему SAC387 (Sn-Ag3.8-Cu0.7). Результаты исследования выводились на графике, на котором представлены минимальная температура пайки и максимальная рабочая температура, определение которой производилось с помощью сплава SnPb при температуре +85 °C. На рис. 1 область, выделенная зеленым цветом, представляет необходимые для исследуемого сплава величины температуры пайки и рабочей температуры. Влияние каждого элемента показано в таблице. Очевидно, что «целевая область», показанная на рис. 1, недостижима ни в одном из случаев добавления элемента. Все добавки увеличивают максимум безопасной рабочей

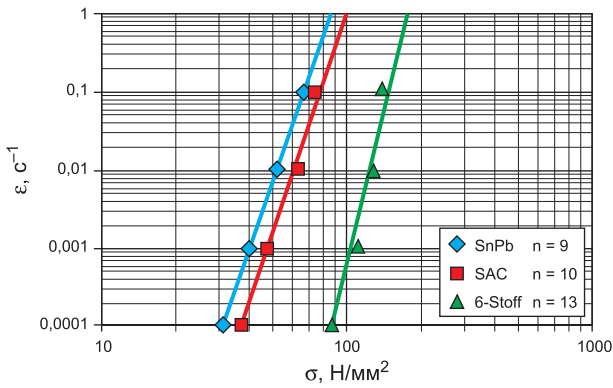


Рис. 2. Зависимость величины скорости ползучести сплавов от максимальной температуры

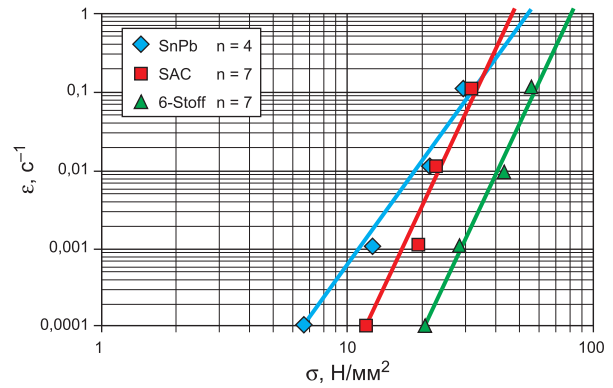


Рис. 3. Зависимость величины скорости ползучести сплавов от температуры окружающей среды

компонентов сплава, улучшающих термо-механические характеристики, но ухудшающих смачиваемость сплава, представляется шагом назад. Исследование поведения при смачиваемости включало различные условия: разные окружающие среды, температуры пайки сплава и финишные покрытия. Для оценки паяемости компонентов и проверки флюса использовался метод баланса смачивания. Если все остальные переменные для проверки оставить постоянными и изменять только характеристики сплава, можно получить относительную оценку влияния сплава на пайку. Проверка смачиваемости была проведена для двух сред (воздух и азот) с тремя значениями температуры пайки (+225, +235 и +260 °C) на тестере для контроля смачиваемости. Проводились измерения каждого контакта

при максимальной силе смачиваемости ( $F_{\text{max}}$ ) и времени до получения нулевой величины силы смачиваемости ( $T_{\text{zero}}$ ). Значение  $F_{\text{max}}$  соответствует варианту D, а  $T_{\text{zero}}$  соответствует варианту C (рис. 4). Основное требование смачиваемости для нового сплава — соответствие стандартному сплаву SAC. При проверке на смачиваемость использовалось несколько компонентов и финишных покрытий ПП, одним из ключевых показателей была возможность применения сплава с финишным покрытием медной основы органическим защитным слоем для обеспечения паяемости (Organic Solderability Preservative, OSP), это может быть проверено после проведения термического старения.

Результаты для поверхности, покрытой OSP, показаны на рис. 5. Необходимо отме-

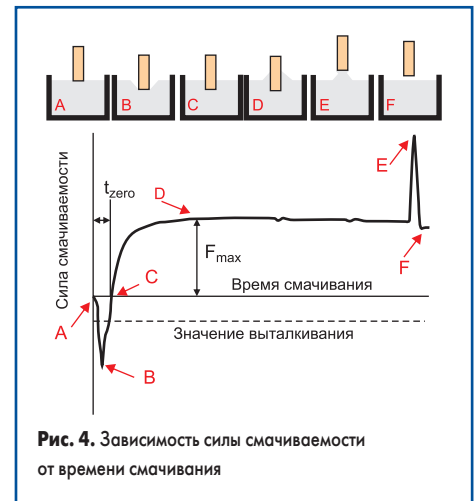


Рис. 4. Зависимость силы смачиваемости от времени смачивания

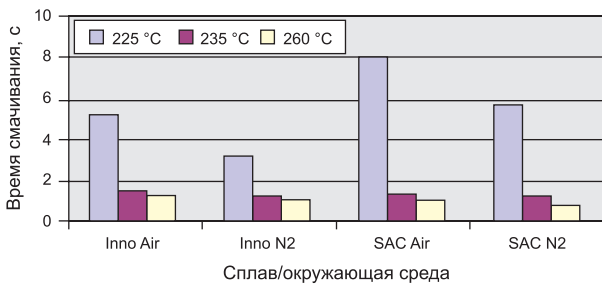


Рис. 5. Время смачивания в зависимости от используемых окружающих сред при температурах пайки, равных +225, +235 и +260 °C

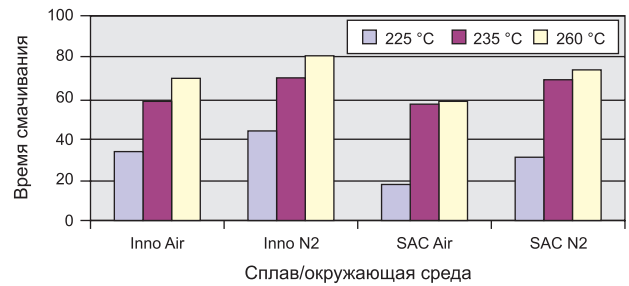


Рис. 6. Максимальная сила смачиваемости в зависимости от используемых окружающих сред при температурах пайки, равных +225, +235 и +260 °C

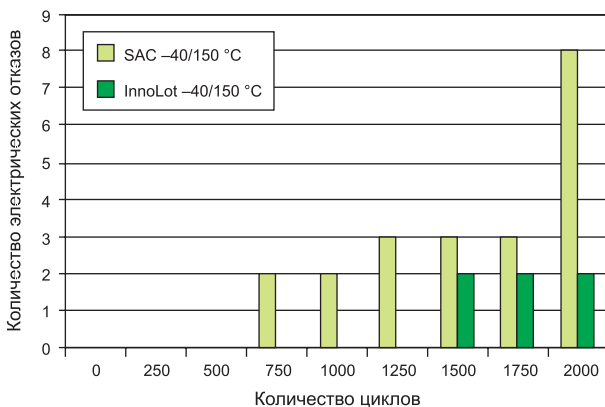


Рис. 7. Количество электрических отказов в зависимости от количества циклов

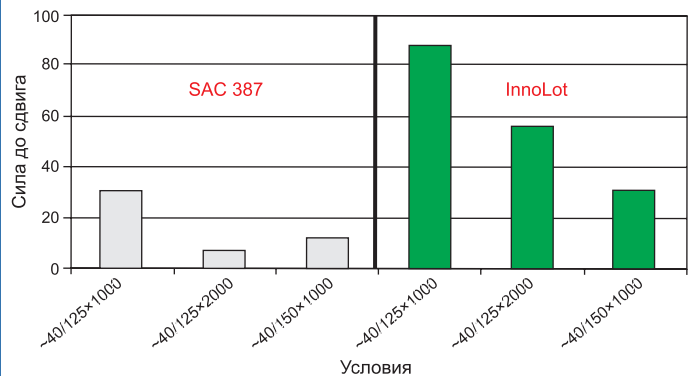
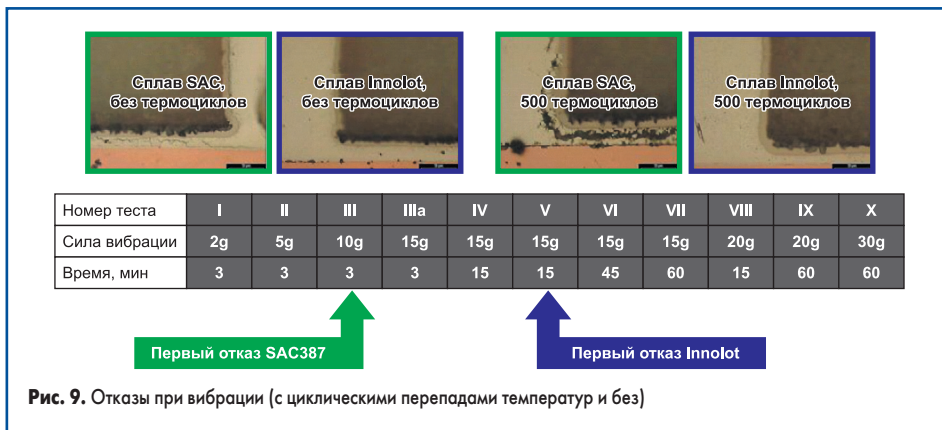


Рис. 8. Зависимость величины прикладываемой силы до сдвига в зависимости от количества термоциклов и величины перепада температур



**Рис. 9.** Отказы при вибрации (с циклическими перепадами температур и без)

тить, что сплав InnoLot имеет большую скорость смачиваемости, чем сплав SAC387, при более низкой температуре пайки. Но при более высоких температурах скорости смачиваемости данных сплавов равны. Такие различия в свойствах могут быть нивелированы введением в сплав висмута (рис. 5).

На рис. 6 показана и сила смачиваемости. При проверке сплава в более низких температурах (+225 °C) сплав InnoLot показывает отчетливое уменьшение значения силы смачиваемости и времени по сравнению с базовым сплавом SAC387. При температуре +235 °C и выше значения практически не отличаются. Примечательно, что сплав лучше выдерживает уменьшение температуры по сравнению со сплавом SAC387 (рис. 7, 8).

### Проверка на надежность

После получения подтверждения того, что свойства и характеристики пайки сплава удовлетворяют критериям разработки, следующим этапом является проверка на механическую надежность. Снова сравним сплав InnoLot

с базовым сплавом SAC387. При тестировании сначала проводилось циклическое повышение и понижение температуры, использовались резисторы серий RC0402-RC2512, их состояние контролировалось с помощью приборов, количество отказов регистрировалось каждые 250 циклов, всего было проведено 2000 циклов. Результаты исследования представлены на рис. 9. Сплав SAC387 показал значительное количество отказов после 750 циклов, тогда как сплав InnoLot не имел отказов даже после 1500 циклов.

Следующим этапом проверки было тестирование на прочность при сдвиге, проводящееся на большой скорости при циклических перепадах температур (термоциклах). Тестирование показало (результаты приведены на рис. 9), что сплав InnoLot имеет такие же свойства после 1000 термоциклов (перепад температуры составляет от -40 до +150 °C), что и сплав SAC387 после 100 термоциклов (перепад температуры от -40 до +125 °C). После 1000 термоциклов с температурами от -40 до +125 °C разница в поведении сплавов стала еще значительнее.

Финальная проверка на надежность состояла в тестировании платы при циклических перепадах температур и вибрации. В этих условиях сплав SAC387 показал себя очень плохо. Во время вибрации без перепадов температур сплав SAC387 начал трескаться в месте соединения печатной платы и резистора. Со сплавом InnoLot такого не случилось. После того как к вибрации добавили перепады температур, сплав SAC387 начал разрушаться, а сплав InnoLot остался неповрежденным (рис. 9).

### Объемы производства

В результате разработки сплава InnoLot консорциумом конечных пользователей, поставщиков и ученых было получено решение, которое может использоваться в электронном оборудовании, эксплуатирующемся в жестких, даже экстремальных условиях — например, при сильных вибрациях или высоких температурах, которые обычные бессвинцовые сплавы на основе SAC не выдерживают.

С момента его получения в 2004 году новый сплав был принят в работу некоторыми производителями транспортных средств, и таким образом перешел из области теоретических исследований в реальное производство. Интерес к сплаву InnoLot со стороны производителей до сих пор высок, поскольку они все чаще сталкиваются с проблемой того, что сплавы на основе SAC не выдерживают эксплуатацию устройств в экстремальных условиях. Конечно, в настоящее время большая часть компаний-изготовителей сфокусировала свое внимание на технологиях поверхностного монтажа, однако новый сплав незаменим в некоторых процессах селективной пайки.