

Реакционные припои в электронике — ОПЫТ И ПОТЕНЦИАЛ

Реакционные припои, которым свойственно образование сплава припоя во время самого процесса пайки, получили известность и применение в электронной промышленности около десяти лет назад. Значительное преимущество этих припоев — относительно невысокая температура пайки при высокой температуре эксплуатации паяных соединений. Специальные паяльные пасты были разработаны для изготовления в первую очередь высокотемпературной электроники, особенно для применения в автомобильных электронных модулях. Наряду с многочисленными научными работами и лабораторными исследованиями в данной области имеются также результаты серийного изготовления реакционных паст.

Матиас Новоттник,
профессор, д. т. н.

mathias.nowotnick@uni-rostock.de

Вольфганг Хертель
Клаус Витке,
профессор, д. т. н.
Маркус Детерт

Перевод:
Андрей Новиков

andrej.novikov@uni-rostock.de

Основы

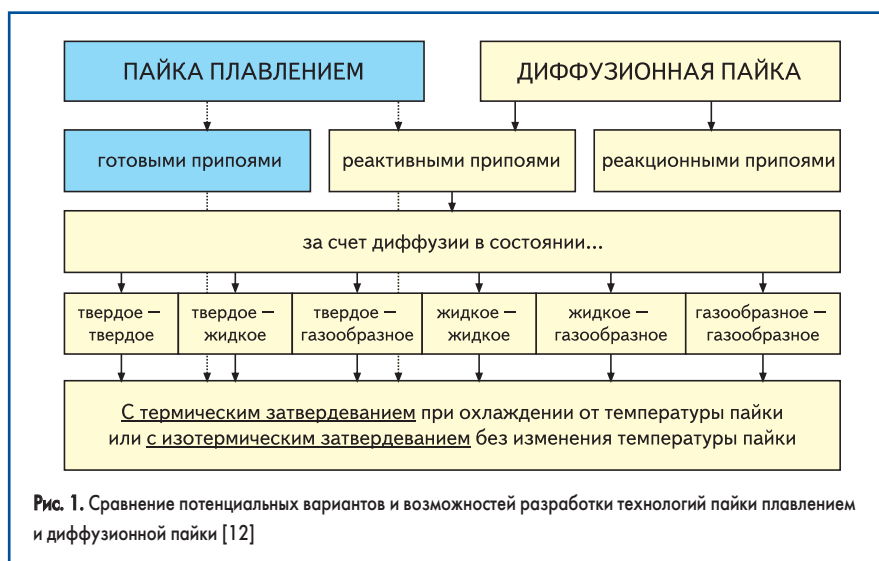
Для пайки мягкими припоями в электронике применяются преимущественно припои на основе олова, как правило, SnAgCu, SnAg, SnCu, или свинецосодержащий припой SnPb. В технологии пайки плавлением с предварительно нанесенным припоем (например, конвекционная или конденсационная пайка), а также в технологии пайки с нанесением припоя во время самого процесса пайки (например, пайка волной или погружением) данные сплавы применяются за редким исключением в виде готовых припоев. Хотя данные готовые припои доминируют в различных применениях, они представляют собой лишь малую долю технически возможных решений. На рис. 1 представлен обзор разнообразных вариантов [12], среди которых наряду с готовыми припоями следует отметить реактивные и реакционные припои.

В то время как окончательная конфигурация состава сплавов готовых припоев выполняется производителем припоев, и они применяются в дальнейшем

исключительно для пайки оплавлением, диффузионная пайка возможна лишь с применением реактивных и реакционных припоев. При этом сплав припоя образуется непосредственно во время процесса пайки, в реактивных припоях — за счет восстановления металлов из металлических соединений, а в реакционных припоях — за счет реакции между двумя и более металлическими компонентами. При этом возникает возможность инициировать диффузионные процессы не только из жидкого состояния, но также из твердого или газообразного состояния.

Для изготавливаемых паяных соединений могут быть достигнуты определенные характеристики, которые нельзя реализовать при применении стандартной технологии пайки оплавлением готовыми припоями. Диффузионная пайка реактивными и реакционными припоями открывает абсолютно новые возможности, особенно для паяных соединений из мягких припоев, которые в дальнейшем эксплуатируются, как правило, в вязком и вязко-жидком состоянии материала [3]. Для полноты картины необходимо также заметить, что пайка не ограничивается применением металлических материалов, из чего следует, что возможно также применение неметаллических компонентов реактивных и реакционных припоев. Большое количество всевозможных примеров из различных областей применения представлено в [1] и [2].

В то время как при высокотемпературной пайке в области машиностроения диффузионная пайка и применение реактивных и реакционных припоев на данный момент отражают современное состояние техники [13], разработка материалов и процессов в этой интересной области для применения в электротехнике и электронике началась лишь несколько лет назад. Так, например, в рамках исследовательских проектов (финансируемых Федеральным министерством образования и науки Германии) «Мягкие припои с гетерогенной модификацией» и «Новаторские системы припоев — InnoLot» были разработаны и запатентованы (DE19728014/1999 [10];



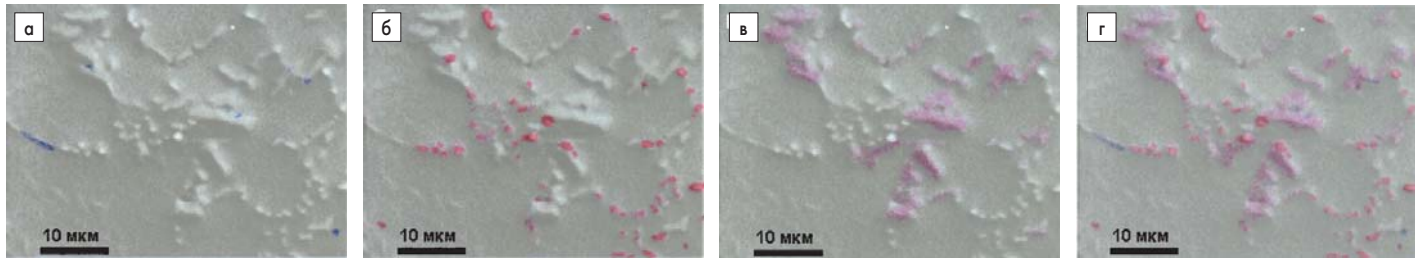


Рис. 2. REM-снимок микрошлифа паяного соединения и распределение элементов фаз Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 и $PdSn_4$, полученное методом спектрального анализа волновой дисперсии: а) Ag, б) Cu; в) Pd; г) Ag+Cu+Pd

DE10319888/2004 [11]) специальные решения для применения в высокотемпературной электронике, особенно в автомобильной электронике.

Примеры применений

Вышеописанные разработки привели к созданию паяльных паст, которые доступны на рынке с недавнего времени и уже были успешно применены в некоторых специальных областях [4]. Описанный в [10] реакционный припой представляет собой смесь из трех порошкообразных компонентов SnAg, SnCu и Pd. Эти три компонента находятся в определенной пропорции и дополнены подходящим флюсом для создания паяльной пасты, которая может быть обработана как обычная бессвинцовая паяльная паста. Во время пайки происходит реакция между этими тремя компонентами. В ходе экзотермической реакции происходит выделение тепла, что также способствует улучшению смачивания. В результате образуется паяное соединение с матрицей сплава, которая содержит равномерно распределенные выделения интерметаллических фаз Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 и $PdSn_4$, за счет чего значительно увеличивается сопротивление ползучести, особенно при высоких температурах. На рис. 2 показана структура такого паяного соединения, упрочненного дисперсией, которое было изготовлено из реакционного припоя.

Согласно предписанию, данные паяные соединения обладают большей надежностью при высоких температурах эксплуатации. Эти соединения были успешно опробованы в автомобильной электронике при температуре 160 °С. После получения результатов практических исследований в 2000 году было серийно произведено более 200 000 сенсоров с реакционными паяльными пастами и не зафиксировано ни одного отказа, связанного с процессом



Рис. 3. Пример применения реакционных паяльных паст: датчик температуры выхлопных газов DTS-P

пайки оплавлением. Типичный пример из данной области — датчик температуры выхлопных газов, показанный на рис. 3.

Надежность паяных соединений, изготовленных из реакционного припоя, была испытана с помощью различных ускоренных ме-

тодов тестирования, а также было проведено сравнение со стандартными припоями. В качестве примера на рис. 4 представлены кривые интенсивности отказов в ходе нагрузки до 2000 температурных циклов от -40 до +160 °С. Значительно меньшая интенсивность отказов по сравнению с паяными соединениями, изготовленными из готовых припоев SnAg и SnAgCu, не претерпевает заметных изменений и после большого количества циклов.

Дополнительно к установлению величин интенсивности отказов также были изготовлены и проанализированы микрошлифы отдельных паяных соединений чип-резисторов после нагрузки. В исходном состоянии можно обнаружить дисперсные выделения в паяных соединениях, изготовленных из реакционных припоев (рис. 5). Также было обнаружено, что паяные соединения, изготовленные из готовых припоев, имеют более крупные интерметаллические фазы на границах с основным материалом уже после процесса пайки.

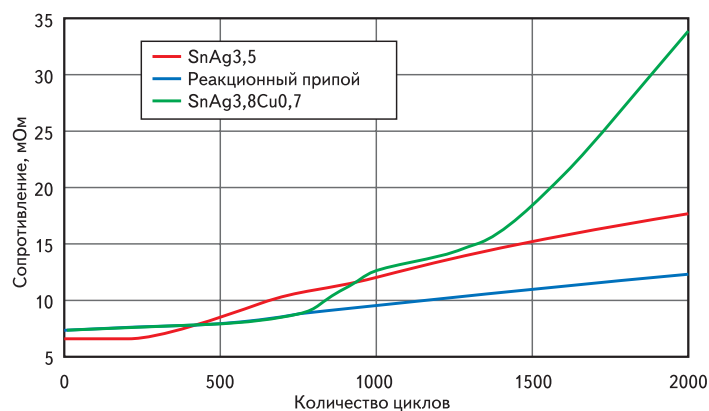


Рис. 4. Сопротивление паяных чип-резисторов с нулевым сопротивлением при циклической температурной нагрузке -40...+160 °С

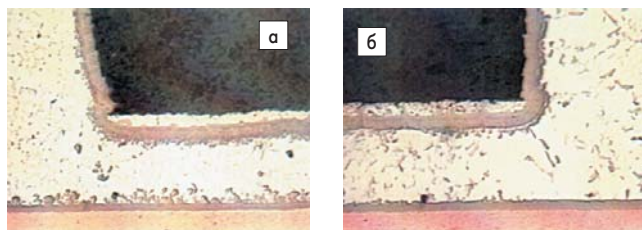


Рис. 5. Микрошлиф структуры паяных соединений в исходном состоянии: а) паяное соединение из готового припоя SnAg3,5; б) паяное соединение из реакционного припоя RKL (SnAg+SnCu+Pd)

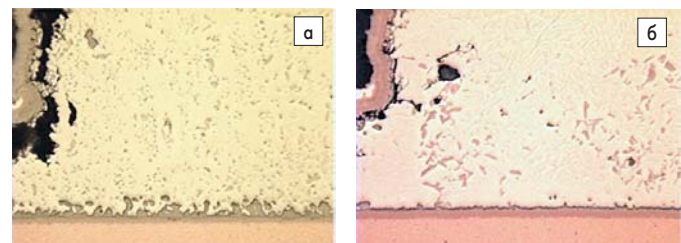


Рис. 6. Микрошлиф структуры паяных соединений после 2000 циклов температурной нагрузки -40...+160 °С (термошок): а) паяное соединение из готового припоя SnAg3,5; б) паяное соединение из реакционного припоя RKL (SnAg+SnCu+Pd)

После 2000 температурных циклов $-40...+160\text{ }^{\circ}\text{C}$ при сравнении этих двух паяных соединений была обнаружена значительная разница в образовании и росте трещин. В то время как при применении обычного припоя SnAg около 10% паяных соединений имели электрические отказы, и припой имел соединение с компонентом лишь в некоторых местах (рис. 6), в структуре паяных соединений, изготовленных из реакционных припоев, видны лишь начинающиеся небольшие трещины. Дисперсные выделения препятствуют распространению трещин в данных паяных соединениях. Кроме того, видно, что рост фаз на границе медной контактной площадки и изготовленного из реакционной паяльной пасты паяного соединения происходит значительно медленнее. Это также обеспечивает повышенную надежность соединений.

Условия обработки реакционных припоев не отличаются от условий, необходимых для обработки бессвинцовых припоев. Пайка оплавлением предварительно нанесенного припоя возможна в воздушной среде, причем продукты реакции и остатки флюса не оказывают негативного влияния на надежность. После 21 дня при температуре $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 92% (согласно немецкой промышленной норме DIN 32513) не было зафиксировано повышения сопротивления изоляции на поверхности печатной платы. При нормальных условиях сопротивление изоляции составило 10^{13} Ом .

Разработанный в рамках проекта InnoLot реакционный припой уже предлагается на рынке [5] и проходит дальнейшие испытания в различных продуктах автомобильной электроники. В данной системе сплава, которая состоит из SnAgCu, Ni, Sb и Bi, во время реакции компонентов происходит дополнительное увеличение температуры плавления, за счет чего температура распайки паяного соединения [9] превышает точку начала плавления отдельных компонентов. При применении данной системы реакционного припоя было также установлено значительное повышение надежности, особенно при более высоких температурах эксплуатации [7]. При нагрузке температурными циклами $-40...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ первые отказы паяных соединений из реакционного припоя были зафиксированы после 1500 циклов, в то время как первые отказы паяных соединений из обычного готового припоя SnAgCu происходят уже после 750 циклов. Тем самым свойства паяных соединений из реакционного припоя при температуре $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ похожи на свойства паяных соединений из известного припоя SnAgCu при максимальной температуре эксплуатации $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7].

Потенциал для дальнейших исследований

Успешное опробование первых применений реакционных припоев в электронике открывает широкие возможности для дальнейших разработок. В областях, в которых паяные соединения, изготовленные из обычных готовых припоев, уже достигли своих преде-

лов, реакционные припои являются рациональной альтернативой. Так, например, при монтаже компонентов силовой электроники возникают проблемы при увеличении мощности и площади компонентов. Для достижения определенного распределения тока и тепла необходим равномерный зазор паяного соединения. Равномерный зазор может быть реализован с помощью смачиваемых матрицей припоя частиц с определенным диаметром [6]. Есть примеры реализации ограничителя высоты с помощью реакционного припоя с медными шариками диаметром в 100 мкм. Подобным образом с помощью выделений меди в расплаве припоя может быть увеличена высота шариков припоя на кремниевой пластине и даже реализованы двухуровневые шарики припоя [14].

При монтаже компонентов силовой электроники особую сложность представляет не только реализация определенных геометрических размеров, но и обеспечение термомеханической стабильности. Данная проблема может быть успешно решена с помощью реакционных припоев. Особенно для сильно нагруженных паяных соединений между компонентами с очень большой разницей коэффициентов температурного расширения, например, при монтаже кремниевых микрочипов на печатную плату, выгодным решением является применение паяльных материалов с очень высокой пластичностью, таких как припой PbSn5. На подобные применения распространяется обобщенное исключение из закона по запрету применения свинца в электронике, так как до сих пор не найдено эквивалентной замены.

Значительный технический недостаток припоев с высоким содержанием свинца заключается в высокой точке плавления данных припоев, которая превышает температуру $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, и, следовательно, в необходимой температуре обработки около $350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для монтажа на печатной плате столь высокая температура достаточно проблематична, так как максимальная нагрузка материала печатной платы составляет $250...260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако именно система сплава SnPb предоставляет широкие возможности для изменений. Температура солидуса может варьироваться за счет соотношения компонентов в припое от $327\text{ }^{\circ}\text{C}$ до известной температуры эвтектики, составляющей $183\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для монтажа микрочипов была изготовлена и протестирована в лабораторных условиях фольга из реакционного припоя, которая состоит из фольги припоя PbSn5 толщиной около 200 мкм и тонкого (в несколько микрометров) покрытия из олова с обеих сторон (рис. 7).

Данная фольга из реакционного припоя образует на границе между фольгой из припоя PbSn5 и покрытием из олова расплавленную фазу уже при $183\text{ }^{\circ}\text{C}$. Монтаж микрочипов происходит при небольшом надавливании при температуре пайки в $240\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате создается равномерное паяное соединение с постоянной высотой зазора, которое за счет большого содержания свинца обладает большой пластичностью и хорошо компенсирует разницу в расширении микрочипа и субстрата (рис. 7). Изначальное оловянное покрытие рас-

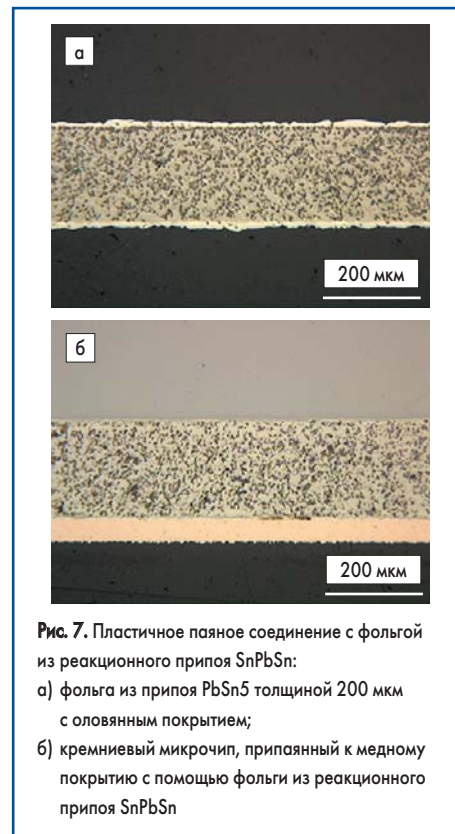


Рис. 7. Пластичное паяное соединение с фольгой из реакционного припоя SnPbSn:
а) фольга из припоя PbSn5 толщиной 200 мкм с оловянным покрытием;
б) кремниевый микрочип, припаянный к медному покрытию с помощью фольги из реакционного припоя SnPbSn

пределяется за счет диффузии в паяном соединении и измененном в процессе пайки основном материале и не может быть детектировано при анализе микрошлифа соединения.

Реакционные припои на основе галлия представляют собой большой потенциал для дальнейшего развития в области низкотемпературного монтажа микрочипов. Система сплава медь-галлий допускает вариацию температуры солидуса от 29 до $1084\text{ }^{\circ}\text{C}$ (теоретическое значение). Результаты исследования [8] показывают, что эта известная система материалов может быть также применена в области монтажа микроэлектронных компонентов. Смесь из частиц меди и матрицы жидкого галлия может быть непрерывно отверждена за счет происходящей диффузии. В зависимости от температуры данный процесс, обозначаемый как «амальгамирование», может продолжаться несколько часов и ведет к значительному повышению твердости и, следовательно, прочности. Так же как известные из зубоврачебной практики амальгамы, содержащие ртуть, данные металлургические пасты могут быть отверждены при низкой температуре за счет процессов диффузии. В [8] описана возможность применения реакционных припоев системы Ga-Cu-Ni для монтажа Flip-Chip компонентов.

Выводы

С начала разработки реакционных припоев в области электроники в 1990-х годах и до настоящего времени были успешно протестированы первые применения с данными припоями для особых требований. В данных областях применения, особенно в области автомобильной электроники, реакционные припои успешно прошли испытания. Однако эти первые

применения не исчерпывают потенциал развития реакционных припоев. В тех случаях, когда обычные готовые припои достигают своих границ, например высоких температур эксплуатации, низких температур пайки или очень высокой механической нагрузки, реакционные припои могут быть разумным альтернативным решением.

Примечание. Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen, 2008, № 4, Германия). Данная статья отмечена, как "Best Paper Award" на конференции «Elektronische Baugruppen und Leiterplatten — 2008» (Электронные модули и печатные платы — 2008), Штуттгарт, Германия.

Литература

1. Wittke K., Scheel W. Die Lötverbindung — Buch 1, Buchreihe Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik — aktuelle Berichte, Band 5, Verlag Dr. Markus A. Detert, Templin 2007.
2. Wittke K., Scheel W. Die Lötverbindung — Buch 2, Buchreihe Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik — aktuelle Berichte, Band 6, Verlag Dr. Markus A. Detert, Templin 2008.
3. Nowottnick M. Zuverlässigkeit stoffschlüssiger Fügeverbindungen für Hochtemperatur-Elektronikbaugruppen; Buchreihe Aufbau und Verbindungstechnik in der Elektronik — aktuelle Berichte, Band 4, Universität Rostock, Rostock 2006.
4. Härtel W. Reaktionslote und andere Pastensysteme, Firmenschrift, Freiberg 2007.
5. Stannol: InnoLot — Technisches Datenblatt, Firmenschrift, Wuppertal 2007.
6. Kuhlmann F. u.a. Electronic Assembly with Controlled Solder Joint Thickness, US Patent 20060255476, 16.05.2005.
7. Brown S. Development of a Fatigue-Resistant Lead Free Alloy for High-Performance Automotive Applications, IPC/JEDEC International Conference International on Lead Free Electronics, 4–5 October 2007 in Berlin, Germany.
8. Baldwin D. F., Deshmukh R. D., Hau C. S. Gallium Alloy Interconnects For Flip-Chip Assembly Applications, IEEE Transactions On Components And Packaging Technologics, VOL. 23, NO. 2, June 2000.
9. Wittke K., Scheel W., Nowottnick M. Aus-löttemperatur von Lötverbindungen — Wesen und technische Bedeutung; DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen — Aufbau- und Fertigungstechnik, Fellbach 4/5.2.2004.
10. Albrecht H.-J., Doerr M., Haertel W., Scheel W., Berek H., Hannemann M., Pachschoell H., Wittke K. Verfahren zum Weich-löten von Metallen und Weichlot zur Ausführung dieses Verfahrens; DE19728014; 1999/01/07.
11. Albrecht H.-J., Bartl K. H. G., Kruppa W., Mueller K., Nowottnick M., Petzold G., Steen H. A. H., Wilke K., Wittke K. Lotmaterial auf SnAgCu-Basis; DE10319888; 2004/11/25.
12. Wittke K., Scheel W., Köhler G. Diffusion-slöten — Wirkprinzip und Verfahrensvarianten. LÖT'01, Aachen, DVS-Berichte Bd. 212, DVS-Verlag Düsseldorf 2001.
13. Wittke K., Füssel U. Kombinierte Fügeverbindungen, Springer Verlag, Berlin 1996.
14. Nowottnick M. Bleifreie Lotmaterialien und Beschichtungen für die CSP-Montage, Tutorial 3: Wafer Level Packages — Eine SMD-kompatible Alternative zu Standard CSP, SMT Kongress, Nürnberg 2005.