

Технологии пайки

НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Широкое распространение бессвинцовых паяльных паст, а также расширение типов корпусов компонентов (начиная с больших BGA-корпусов и заканчивая компонентами типа fine-pitch), приводит к необходимости разработки новых паяльных печей для обеспечения большей управляемости процессом теплопередачи.

**Хиро Суганума,
Алвин Таманаха,
Антон Ефимов**

support@npf-abris.ru

В таблицах 1 и 2 приведены характеристики типичных бессвинцовых паяльных паст. Из таблицы 1, в которой приведены характеристики основных паяльных паст (исключая содержащие висмут), видно, что бессвинцовые паяльные пасты имеют большую температуру плавления, чем общепринятые припой Sn/Pb. Из параметров оплавления пасты на меди (таблица 2) видно, что, кроме того, бессвинцовые паяльные пасты не смачивают поверхность так же хорошо, как припой Sn63/Pb37, который растекается тонким и широким слоем. Дополнительные тесты показали, что, в то время как припой Sn63/Pb37 имеет растекаемость 93%, у бессвинцовых паст этот параметр варьируется от 73 до 77%.

Паяльные пасты состава Sn63/Pb37 имеют температуру плавления 183°, при этом пиковая температура выводов небольших компонентов достигает 240°, а температура выводов больших компонентов — 210°. Однако эта разница в 30° между большими и малыми компонентами не влияет на характеристики паяных соединений. Это связано с тем, что паяные соединения формируются при температуре припоя на 27–57° выше температуры плавления. И так как текучесть металлов увеличивается при больших температурах, эти условия благоприятны для производства.

У бессвинцовых припоев, однако, точка плавления, например, Sn/Ag достигает 216–221°. Это приводит к тому, что выводы больших компонентов должны быть нагреты до температуры выше 230°, чтобы гарантировать плавление. Если при этом пиковая температура выводов малых компонентов не должна превышать 240°, то разница между большими и малыми компонентами уменьшается до 10°. Это также резко уменьшает разницу между точкой плавления припоя и пиковой температурой пайки в печи (рис. 1). Таким образом, в печи должна быть снижена разность пиковой температуры между большими и малыми компонентами и должен поддерживаться стабильный температурный профиль по поверхности печатной платы для обеспечения высоких производственных характеристик.

Поддержание пиковой температуры

Необходимо учитывать теплоемкость и теплопроводность нагреваемых элементов. Это особенно важно для корпусов BGA (и печатных плат), которые нагреваются первыми. Тепло затем передается контактным площадкам и сферическим BGA-выводам для формирования паяных соединений. Например, воздух температурой 230° нагревает поверхность корпу-

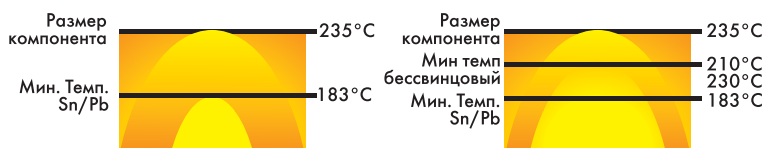


Рис. 1. Рабочий диапазон для Sn/Pb (слева) и бессвинцовых паяльных паст. Для обеспечения стабильного профиля оплавления необходимо уменьшить разность пиковых температур для больших и малых компонентов

Таблица 1. Типичные характеристики бессвинцовых припоев

Сплав	Температура плавления, °С	Предел текучести	Смачивание	Термостойкость
Sn/3.5Ag	216–221	Отлично	Отлично	Отлично
Sn/3.5Ag/0.7Cu	эвтектический			
Sn/5.8Bi	139–200	Хорошо	Хорошо	Отлично
Sn/0.7Cu	227	Хорошо	?	?
Sn/9.0Zn	190–199	Отлично	Хорошо	Отлично
Sn/8.0Zn/3.0Bi	эвтектический			

Таблица 2. Параметры смачивания по меди*

Припой	Темп., °С	Краевой угол	Время (с)
63Sn/37Cu	260	17	3,8
96.5Sn/3.5Ag	260	36	2
95Sn/5Sb	280	43	3,3
42Sn/58Bi	195	43	9,3
501Sn/50In	215	63	14,2

* По материалам «IPC works 99», «Lead free solders», dr. J Hwang

са быстрее, и даже при значительной скорости обдува контактные площадки и BGA-выводы будут нагреваться ощутимо дольше, чем обычно. Таким образом, во избежание теплового шока монтируемые детали не должны перегреваться в зоне плавления, а контактные площадки и плавкие выводы BGA должны быть нагреты до температуры, достаточной для формирования паяного соединения.

Системы паяльных печей

Два самых простых метода нагрева для пайки — это воздушная конвекция и инфракрасный нагрев. При использовании воздуха в качестве средства для передачи тепла конвекция идеальна для нагревания компонентов, которые «выступают» из платы, таких, как выводы и маленькие детали. Однако при этом образуется пограничный слой между горячим воздухом и платой, который делает подачу тепла последней неэффективной (рис. 2).

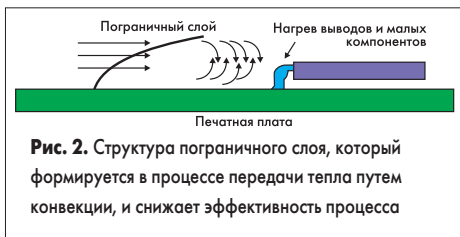


Рис. 2. Структура пограничного слоя, который формируется в процессе передачи тепла путем конвекции, и снижает эффективность процесса

При ИК-нагреве инфракрасные нагреватели передают энергию путем электромагнитного излучения, которое будет равномерно нагревать компоненты при правильном управлении. Однако при отсутствии правильного управления может произойти перегрев платы и компонентов. ИК-излучатели, такие, как лампы и нагревательные стойки, имеют ограниченную площадь, при этом зона наибольшего нагрева находится непосредственно под нагревателем. По этой причине ИК-нагреватели должны быть больше, чем целевая ПП, чтобы обеспечить равномерную теплопередачу и предотвратить остывание ПП.

Из трех механизмов теплопередачи — теплопроводность, излучение и конвекция — только два последних поддаются управлению. Теплопередача путем излучения является эффективным и мощным механизмом, что показывает следующая формула:

$$T(K)e=bT^4,$$

где тепловая энергия излучения *e* пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры, *b* — постоянная Стефана—Больцмана.

Таким образом, требуется прецизионное управление температурой, из-за того, что мощность ИК-нагрева очень чувствительна к температуре нагревателя. В то же время конвекционный механизм не является столь мощным, но обеспечивает качественный равномерный нагрев в печи.

ИК + принудительное конвекционное нагревание

Наиболее передовые современные печи используют достоинства обоих методов нагре-

ва. Разница пиковых температур между компонентами может поддерживаться в пределах 8 °С, точность стабилизации температуры при массовом производстве может составлять 1 °С.

Основным принципом совмещения ИК-излучения и принудительного конвекционного нагрева является использование излучения в качестве основного источника нагрева для оптимальной передачи тепла и использование свойств равномерного нагрева при конвекции для уменьшения разницы температур между компонентами и печатной платой. Конвекция служит для нагрева компонентов с большой теплоемкостью, и одновременного охлаждения компонентов с небольшой теплоемкостью.

На рис. 3 кривая 1 описывает нагрев компонента с большой теплоемкостью, а кривая 2 — компонента с небольшой теплоемкостью. Несоразмерность наблюдается только тогда, когда используется только один источник нагрева (ИК-излучение или конвекция). Сплошная кривая показывает результат нагрева одним ИК-излучателем. Кривая, изображенная прерывистой линией, описывает нагрев, элементов при использовании и ИК-нагрева и принудительной конвекции. Добавление конвекции приводит к нагреву компонентов с температурой меньше заданной и к охлаждению компонентов, нагретых до температуры выше температуры горячего воздуха. Следующим достоинством усовершенствованных паяльных печей является более эффективная передача тепла к поверхности ПП. На рис. 4 показана разница между характеристиками теплопередачи для «обдувной» и принудительной конвекции. Со-

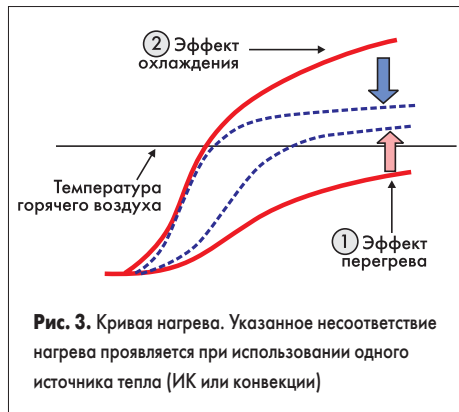


Рис. 3. Кривая нагрева. Указанное несоответствие нагрева проявляется при использовании одного источника тепла (ИК или конвекции)

временная технология позволяет повысить эффективность теплопередачи к ПП и компонентам в три раза.

Кроме того, в современных паяльных печах, в отличие от старых моделей, применяются ИК-нагреватели панельного типа. Панельные нагреватели обеспечивают более равномерный нагрев (рис. 5).

Неравномерность нагрева ПП

Были проведены испытания с целью сравнения разницы температур между корпусом QFP140P и ПП, 45-миллиметровым BGA-корпусом и ПП в трех случаях: нагрев исключительно панельным ИК-нагревателем, нагрев только конвекционной системой и комбинированный нагрев (ИК + принудительная конвекция).

Конвекционный нагрев приводит к разности температур в 22 °С между QFP140P и ПП (по истечении 70 секунд после начала предварительного нагревания). С другой стороны, нагрев при помощи комбинированной системы приводит к разности температур в 7 °С. При нагреве 45-миллиметрового BGA-корпуса с применением только конвекционной системы разность температур составляет 9 °С, применение комбинированной системы снижает это значение до 3 °С. К тому же при использовании обычного температурного профиля разность пиковых температур между ПП и 45-миллиметровым BGA-корпусом составляет всего 12 °С. При использовании трапециoidalного температурного профиля эта разность может быть снижена до 8 °С.

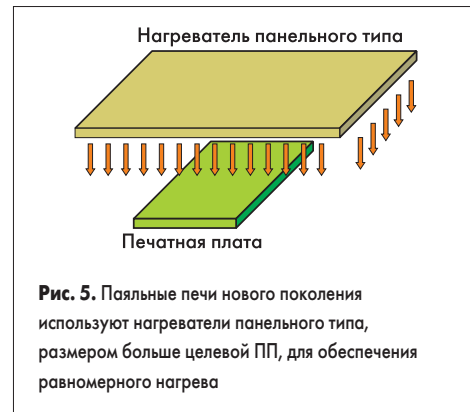


Рис. 5. Паяльные печи нового поколения используют нагреватели панельного типа, размером больше целевой ПП, для обеспечения равномерного нагрева

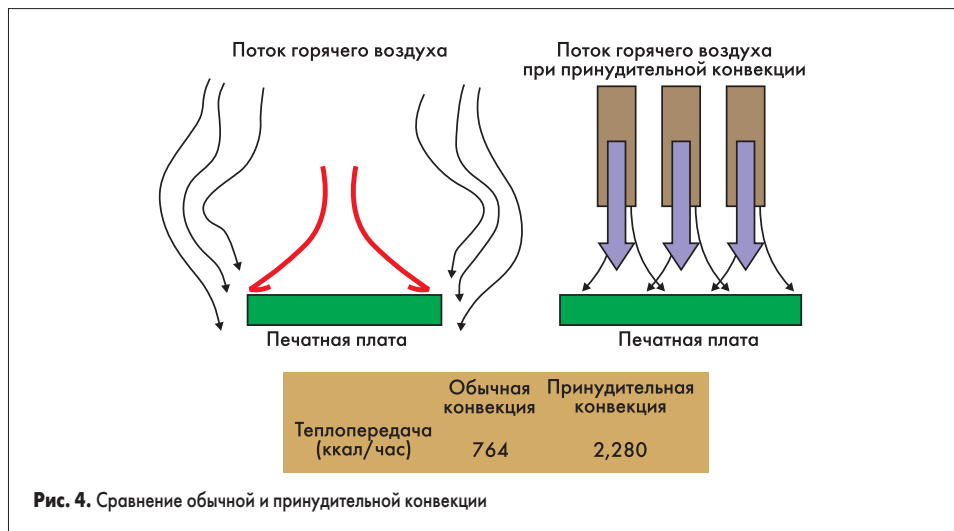


Рис. 4. Сравнение обычной и принудительной конвекции

При промышленном производстве температурная нестабильность играет большую роль, особенно при использовании бессвинцовых паяльных паст. Испытания показали, что пиковая температура для ПП размером $250 \times 330 \times 1,6$ мм на расстоянии в 5 см различается не более чем на 1°C .

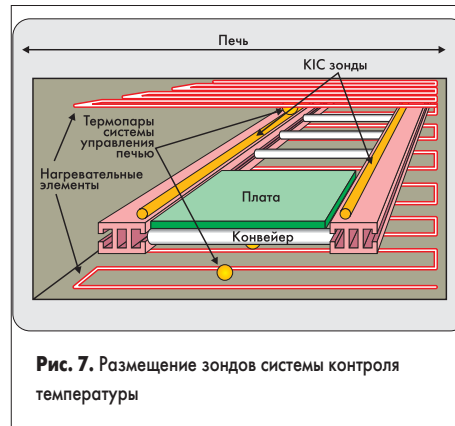
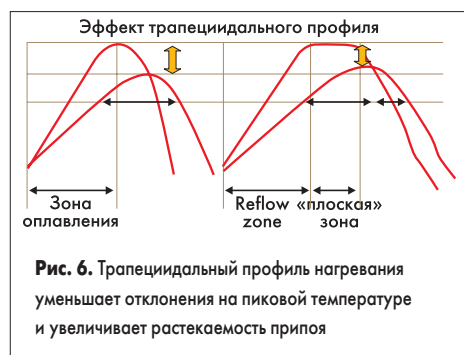
Оптимальный температурный профиль

При использовании бессвинцовых паяльных паст разность температур между компонентами должна быть минимизирована. Одним из методов достижения этой цели является коррекция стандартного температурного профиля. Возможны следующие изменения:

- Увеличение времени предварительного нагрева. При этом значительно уменьшается температурная разность между компонентами перед нагревом до пиковой температуры. В большинстве паяльных печей используется этот метод. Однако из-за слишком быстрого испарения флюса этот метод может привести к плохому смачиванию из-за окисления контактных площадок или выводов.
- Увеличение температуры предварительного нагрева. Обычная температура предварительного нагрева составляет $140\text{--}160^\circ\text{C}$ и может быть повышена до $170\text{--}190^\circ\text{C}$ при использовании бессвинцовых паяльных паст. Повышение температуры предварительного нагрева приводит к снижению необходимого перепада до пиковой температуры, что приводит к уменьшению разности температур между компонентами. Однако этот метод тоже может привести к испарению флюса.
- Использование трапецидального температурного профиля (увеличение времени нагрева с пиковой температурой). Это позволяет компонентам с большой теплоемкостью достичь требуемой температуры и избежать перегрева небольших компонентов. При использовании этого метода, показанного на рис. 6, современные комбинированные паяльные системы позволяют снизить разность температур между 45-миллиметровым BGA-корпусом и корпусом типа small outline (SOP) до 8°C .

Азотные паяльные печи

При использовании бессвинцовых паяльных паст могут возникнуть трудности со смачиванием из-за того, что их температура



плавления обычно высока, а разность между температурой плавления и пиковой температурой не столь велика. К тому же сплавы бессвинцовых паяльных паст обычно обладают худшей растекаемостью. В дополнение к этому бессвинцовые пасты с высокой температурой плавления могут создать проблемы при двухстороннем монтаже. При пайке первой стороны происходит значительное окисление второй стороны при высоких температурах. При температуре выше 200°C значительно увеличивается толщина слоя оксида, что приводит к плохому смачиванию и ухудшению паяемости со второй стороны. Паяльные пасты на основе Sn/Zn также имеют свои особенности (цинк легко окисляется). При окислении припой не сплавляется с остальными металлами. Соответственно, для обеспечения высокой производительности в бессвинцовом процессе может потребоваться использование азота.

При использовании комбинированных систем с панельными ИК-нагревателями в качестве основного источника тепла и конвекции в качестве компенсирующего механизма потребление азота может быть снижено более чем в два раза по сравнению со стандартным (максимальное потребление азота для печей шириной 450 мм — 2 л/мин). Таким образом, вместо больших баллонов азота можно использовать встроенный азотный генератор.

Автоматический мониторинг

В дополнение к использованию печей нового поколения требуется точное соблюдение технологических параметров, что приводит к необходимости постоянного мониторинга, так как даже легкое нарушение технологического процесса приводит к появлению бракованных паяных соединений. Наиболее эффективным методом является постоянный контроль температуры в реальном масштабе времени. Система измерения температуры позволяет сборщикам получать и анализировать данные о характере процесса пайки в реальном масштабе времени. Такие системы обычно содержат порядка 30 термопар, смонтированных на двух узких зондах из нержавеющей стали, которые установлены непосредственно над и под конвейером. Данные с термопар считываются каждые 5 секунд и отображаются на дисплее компьютера в виде температурного профиля пайки.

Система контроля температуры обеспечивает построение температурного профиля для каждой платы путем вычисления математической корреляции между профилем, измеренным термопарами, и общей температурой процесса. Такой «виртуальный» профиль вычисляется каждые 30 секунд. Кроме того, вычисляются статистические данные, такие, как пиковая температура.

Система контроля издает звуковой сигнал при нарушениях технологического процесса и отключает конвейер при выходе за критические параметры. Это позволяет пользователю производить постоянную запись температурных профилей для каждой собранной платы, кроме того, система может передавать данные внешней системе статистического контроля. Другим преимуществом системы измерения температурного профиля в реальном масштабе времени является отсутствие необходимости в остановке производства для измерения профиля стандартным «протяжным» измерителем и настройка печи только по необходимости. Исследования показали, что современные печи с принудительной конвекцией могут долгое время эффективно работать без перенастройки. Использование системы контроля профиля в реальном масштабе времени позволяет производить настройку только по необходимости.

Жестко контролируемый процесс позволяет значительно снизить количество дефектов паяных соединений и стоимость связанных с ними ремонтных работ. Фактически использование таких систем становится промышленным стандартом качества.

Оптимизация температурного профиля

Современное программное обеспечение облегчает задачу перехода к бессвинцовому процессу. Одной из таких программ является система прогноза температурного профиля, которая позволяет пользователю рассчитать оптимальный температурный профиль за несколько секунд. Система центрирует профиль в окне технологического процесса, пределы которого задаются пользователем.

Заключение

Применение бессвинцовых паяльных паст значительно сужает окно технологического процесса, особенно из-за требуемой пиковой температуры. Разность температур между компонентами, а также нестабильность температуры должны быть минимизированы для обеспечения высококачественного производства. Для этого необходимо точно контролировать процесс теплопередачи. Комбинированные системы «ИК + принудительная конвекция» обеспечивают выполнение требований бессвинцового процесса. В комплексе с системой прогноза температурного профиля пайки и системой контроля температурного профиля в реальном масштабе времени такая технология обеспечивает минимизацию брака при пайке бессвинцовыми паяльными пастами.