

Покрyтия под пайку

Поверхности, предназначенные для пайки, имеют покрытия, которые должны обладать способностью к смачиванию припоем и длительное время сохранять эту способность. Для того чтобы пайка электронных модулей прошла успешно, покрытия компонентов и печатных плат (финишные покрытия) должны хорошо сочетаться, поскольку при пайке они находятся в одинаковых условиях и по припою, и по флюсу, и по температурно-временным режимам. Существующие оценки покрытий, предназначенных под пайку, сегодня приходится пересматривать в связи с возможным применением в производстве бытовой аппаратуры бессвинцовых технологий пайки.

**Аркадий Медведев,
д. т. н.,
профессор МАИ**

При большом разнообразии финишных покрытий невозможно сделать выбор в пользу одного-двух, в крайнем случае, трех вариантов, удовлетворяющих всем требованиям по стоимости, смачиваемости, долговременности и т. д. К сожалению, перечень таких покрытий весьма широк [1]:

- OSP (Organic Solderability Preservative);
- NiAu (ENIG — Electroless Ni & Immersion Gold — химический никель и иммерсионное золото);
- ImmAg (Immersion Ag);
- ImBi (Immersion Bi);
- Pd (Electroplate or Electroless Pd — химический или гальванический палладий);
- NiPd (Electroless Ni & Immersion Pd);
- NiPdAu (Electroless NiPd & Immersion Au);
- ImmSn (Immersion Sn);
- NiSn (Electroplate Ni & Sn);
- SnAg (Electroplate Sn & Ag);
- HALS (Hot-Air Solder Leveling).

В этом ряду лидирующими финишными покрытиями печатных плат являются OSP, ENIG, ImmSn, ImmAg и HALS.

В ходе HASL-процесса горячего облуживания платы погружают на ограниченное время в ванну с расплавленным припоем. При быстрой выемке платы обдувают струей горячего воздуха, убирающей излишки припоя и выравнивающей покрытие. Но, несмотря на старания, наплывы припоя остаются. Особенно много их на развитых металлических поверхностях. В последующей сборке наплывы мешают установке мелких компонентов, что ограничивает применение HASL. Однако с точки зрения качества и исключительно длительной способности к пайке данное покрытие, безусловно, наилучшее. Поэтому там, где изготовление плат и сборка происходят на одном производстве, всегда стараются найти компромиссы, чтобы использовать HASL. Эти компромиссы в первую очередь состоят в согласовании сроков пайки. Дело в том, что чрезмерное выравнивание припоя воздушными ножами может привести его к критически малой толщине в отдельных местах, чаще всего на входе в отверстие. Тогда оно через не-

которое время безвозвратно потеряет паяемость из-за прорастания интерметаллидами Sn_xCu_y . Поэтому безгранично выравнивать припой в процессе HASL нет возможности.

Еще один существенный недостаток HASL-процесса — жесткий термоудар, который испытывают платы при погружении в расплавленный припой. Чем выше рабочая температура припоя, тем серьезнее проблема обеспечения надежности межсоединений. Некоторые предприятия не используют HASL-процессы для многослойных плат, считая, что они уменьшают надежность внутренних межсоединений из-за подобных термоударов. К сожалению, сегодня отсутствуют приемлемые по качеству и относительно низкотемпературные бессвинцовые припои для HASL-процессов.

Покрытие OSP обеспечивает защиту медной поверхности от окисления в процессе хранения и пайки. В конце пайки такой слой, выполнив свою функцию, теряет способность обеспечивать последующие процессы пайки. В Японии это дешевое покрытие применяется более 20 лет. Но чтобы выполнять процесс пайки в одну стадию группового нагрева, японские конструкторы изделий учитывают данную особенность в целях снижения себестоимости. OSP — хорошая альтернатива HASL, хотя имеет короткий жизненный цикл, что негативно сказывается на технологической надежности. Это покрытие не обеспечивает многократную пайку, тем более при высоких температурах, и чтобы избежать затруднений, приходится использовать азот в качестве нейтральной среды пайки [8].

Покрытие ENIG (4 мкм Ni + 0,1 мкм Au) — другая альтернатива HASL-процессам. Такое покрытие свободно от ионных загрязнений и способно к многократной пайке при высоких температурах. Функция тонкого слоя золота — защищать никель от окисления, а сам никель служит барьером, предотвращающим взаимную диффузию золота и меди.

Характерный для покрытия ENIG дефект — черные контактные площадки, появляющиеся на поверхности из-за оголения никеля и выпотевания фос-

фора, если тонкий слой золота растворяется в припое раньше, чем припой смочит никель. Фосфор неизбежно внедряется в никель в процессе его химического осаждения. Припой скалывается с фосфорированной и окисленной поверхности никеля, из-за чего и проявляется эффект черной контактной площадки. Черные контактные площадки могут возникать также при передержке процесса пайки и при неправильном выборе флюса. Передержка интенсифицирует образование интерметаллидов олова с никелем и олова с фосфором, внедренным в никель. Кроме того, выделение фосфора на поверхности никеля может вызвать и процесс золочения. Осаждение золота из нейтральных электролитов уменьшает вероятность этих явлений [2].

ENIG капризно в выборе флюсов, а его цена примерно на 25% выше, чем у OSP. Преимущества ENIG:

- жизнеспособность более года;
- плоская контактная поверхность;
- хорошая смачиваемость припоем при правильном подборе флюса;
- неокисляемая поверхность применительно к нажимным и скользящим контактам.

Иммерсионное олово (ImmSn) — еще одна альтернатива HASL-процессам.

Популярность ImmSn растет за счет обеспечения хорошей смачиваемости и простоты процесса осаждения. ImmSn демонстрирует бесперебойную и лучшую паяемость, нежели ENIG.

Из-за образования интерметаллических соединений CuSnY существовали ограничения для применения ImmSn. Причем способность к пайке исчезала через две недели, поскольку толщина иммерсионного олова не превышает 1 мкм и CuSnY быстро поглощает этот тонкий слой.

Однако теперь можно предотвращать подобный эффект, вводя барьерный подслоя различного содержания (органический металл и др.). Способность к пайке ImmSn (0,5–0,8 мкм) с барьерным подслоем (0,08–0,1 мкм) сохраняется, по крайней мере, один год, если не больше.

Преимущества ImmSn с барьерным подслоем:

- относительно низкая стоимость процесса осаждения;
- хорошая и длительная паяемость;
- плоская поверхность покрытия (в отличие от HASL);
- хорошие условия для обеспечения беспаяемых соединений Press-Fit (впрессовывание штырей-хвостовиков разъемов в металлизированные отверстия плат).

В данном случае подозрения, что из ImmSn самопроизвольно могут образоваться нитевидные кристаллические усы, несостоятельны, поскольку толщина покрытия (0,5 мкм) недостаточна для их формирования. А в результате пайки оно теряет самостоятельность для каких-либо неблагоприятных процессов, характерных для чистого олова.

Иммерсионное серебро (ImmAg). Толщина ImmAg не превышает 200 нм, соответственно, расходы на реализацию этого покрытия

незначительны. Жизнеспособность ImmAg гораздо выше, чем OSP, но несколько меньше, чем ENIG. Изменение цвета покрытия в процессе хранения, сборки и пайки — результат загрязнения воздушной среды сульфатами и хлоридами. Пожелтение не сказывается на свойствах ImmAg, но декоративность покрытия при этом страдает. Консервирующие покрытия антиокислителей тормозят процесс пожелтения и продлевают жизнеспособность покрытия. ImmAg менее популярно в Европе, чем в США, где оно более доступно.

Покрyтия компонентов

Существует несколько типов компонентов, в зависимости от конструкции по-разному реагирующих на условия пайки:

- дискретные компоненты, такие как чип-резисторы;
 - SMT-компоненты, например PQFP;
 - корпуса с шариковыми выводами, в том числе BGA-компоненты;
 - компоненты с выводами для пайки в отверстия, в частности, DIP-компоненты.
- Лидирующие на текущий момент покрытия компонентов:
- матовое гальваническое олово для дискретных компонентов;
 - матовое гальваническое олово для SMT-компонентов с коротким жизненным циклом (5 лет и менее);
 - матовое гальваническое олово с никелевым подслоем для долгоживущих компонентов (более 5 лет);
 - Sn4Ag0,5Cu для шариковых выводов BGA;
 - лужение выводов компонентов для пайки в отверстия;
 - гальваническое золочение выводов;
 - гальваническое покрытие никель-бор с последующим горячим лужением.

Чистое олово хорошо паяется в широком диапазоне температур. Однако его использование опасно из-за возможности не только рекристаллизации при температуре хранения ниже 13 °C («оловянная чума»), но и образования усов. Но после пайки чистое олово перестает быть таковым, и опасения теряют актуальность.

Гальваническое Au. Это покрытие используется много лет и не имеет каких-либо нареканий, кроме относительной дороговизны и дополнительных затрат на сбор отходов, естественно возникающих в производстве.

NiB. Данное покрытие капризно ведет себя у потребителя. Проблемы, возникающие в процессах подготовки выводов к пайке и в ходе самой пайки, до конца не изучены. Тем не менее из-за дешевизны оно имеет тенденции к распространению в России.

SnBi. Эвтектический сплав 42Sn58Bi имеет температуру плавления 138 °C. Аналогичный сплав, но содержащий 3% висмута, плавится при температуре 215–220 °C. Эти сплавы тоже проявляют способность к образованию усов, но в сочетании с SnPb-припоями после пайки такая опасность не исчезает.

SnAg. Эти сплавы обладают хорошей паяемостью и хорошими механическими свой-

Таблица 1. Распределение покрытий выводов компонентов под пайку

Покрyтие	Доля
Чистое олово	24%
SnAgCu	11%
NiAu	14%
Ag	5%
SnBi	5%
SnAg	7%
SnCu	7%
PdAu	15%
Неизвестные	11%

ствами, однако их стоимость высока. Сплав Sn3,5Ag относительно дешев, но проявляет склонность к образованию усов. Сплав Sn5,0Ag лишен подобного недостатка, хотя дороже и имеет неприемлемо высокую температуру плавления.

NiPd освоены фирмой Texas Instruments в 1989 году. За прошедшее время фирма продала миллионы компонентов с этим покрытием и не имеет нареканий.

SnCu. Эвтектический сплав Sn0,7Cu — относительно дешевый, мелкозернистый припой, демонстрирующий хорошую паяемость. Но и он проявляет склонность к рекристаллизации олова и образованию усов. Плавится при температуре 227 °C.

Распространенность покрытий компонентов (2003 г.) видна из таблицы 1.

Материалы корпусов компонентов

Высокие температуры пайки требуют от компонентов успешного прохождения испытаний на термоудар, который происходит при погружении в припой на 10 с при температуре 260 °C или на 5 с при температуре 280 °C. Положение усугубляется тем, что в бессвинцовых технологиях термоудар еще сильнее. Это обусловлено не только более высокой температурой плавления бессвинцовых припоев, но и худшей смачиваемостью, из-за чего рабочие температуры пайки бессвинцовыми припоями намного превышают температуры плавления (более чем на 40 °C) для эвтектических сплавов SnPb.

В таких жестких температурных условиях корпуса не должны взрываться (эффект попкорна), деформироваться, обесцвечиваться или подплавляться. Вот почему пластмассы, используемые для корпусов микросхем, отличаются высокой термостойкостью и слабой склонностью к сорбированию влаги, поскольку сорбированная влага при резком нагреве быстро превращается в пар. Давление пара вызывает вздутие корпуса, разрывы, трещины. Даже если пластмассы не трещат, они могут расслаиваться внутри корпуса. Диффузия влаги в объем компаунда пропорциональна температуре и относительной влажности среды. Полное равновесие с внешней средой наступает тем раньше, чем меньше объем корпуса.

Существуют нормативные документы [3], определяющие уровни температуры и влажности, после которых корпуса компонентов

должны выдерживать термоудар. Впоследствии эти уровни соотносятся с разрешенным временем пребывания распакованных компонентов в контролируемой среде цеха до поступления на сборочно-монтажную линию. Указанные сроки могут составлять 4, 8, 16 и 24 часа. Если за данный период компоненты не поступят на пайку, их нужно хранить в сухих шкафах, где поддерживается относительная влажность 3–5%.

Материалы оснований печатных плат

Все сказанное о материалах компонентов относится и к материалам печатных плат. Однако здесь появляется дополнительная проблема — различия в температурных коэффициентах расширения металлизации отверстий (медь 17×10^{-6}) и композиционного диэлектрического основания плат в трансверсальном направлении. Известно [4], что последнему свойственна нелинейная зависимость от температуры с характерным изломом при температуре стеклования связующего (полимера), выше которого основание платы расширяется особенно интенсивно. Известны и условия устойчивости этой комбинации: высокая температура стеклования связующего, высокие прочность и пластичность меди в отверстиях, а для многослойных плат еще и механическая прочность связи торцов контактных площадок внутренних слоев с металлизацией отверстий.

Проблемы бессвинцовой пайки

Сегодня, в связи с опубликованием Директив Евросоюза RoHS, возникают озабоченность и тревога, обусловленные серьезными проблемами, которые появляются при переходе к технологиям бессвинцовой пайки. Пожалуй, можно было бы оправдать все усилия, затраченные при подготовке RoHS, если бы существовала уверенность в необходимости данного акта, которому придают столь большое международное значение. Однако создается впечатление, будто это провокация, затеянная сильными в технологическом отношении фирмами для подавления слабых конкурентов. Подобное чувство объясняется следующими причинами.

Свинец издавна сопровождает быт людей. Мягкий ковкий металл был известен задолго до нашей эры народам Месопотамии, Египта и других стран Древнего мира. Благодаря хорошей ковкости, легкоплавкости и доступности свинца даже в те отдаленные времена из него отливали статуэтки, предметы домашнего обихода, таблички для письма. Римляне изготавливали из свинца трубы для водоснабжения зданий. Благодаря нулевой диффузионной константе и хорошей способности к пластической деформации свинец применяется для опрессовки подводных телеграфных кабелей, проходящих по дну океанов. В частности, такой кабель между Старым и Новым Светом длиной 3750 км был проложен в 1886 году и до сих пор не истлел. Это ли не убедительная демонстрация химической инертности металлического свинца [1]?

По объему производства свинец занимает четвертое место среди цветных металлов после алюминия, меди и цинка. Более 50% мировой добычи свинца используется в кислотных аккумуляторах. Оставшаяся часть свинца имеет очень широкое применение:

- защитные оболочки кабелей;
- влагонепроницаемые упаковки;
- уплотнения швов и стыков труб в химической промышленности и канализации;
- футеровки реакторов;
- сейсмоустойчивые фундаменты;
- скользящие свинцово-графитовые электроды транспорта;
- графитовые сердечники карандашей;
- краски (свинцовые белила, свинцовый сурик);
- шпаклевка;
- производство хрусталя;
- глазурь на гончарных изделиях и т. д.;

Таблица 2. Оценка токсичности потенциальных компонентов сплавов для монтажной пайки

Компонент	Степень токсичности	Оценка
свинец	высокотоксичный	высокий риск
кадмий	чрезвычайно токсичный	высокий риск
сурьма	токсичный, канцероген	средний риск
серебро	не токсичный	нет риска
медь	слаботоксичный	малый риск
олово	слаботоксичный	низкий риск
цинк	слаботоксичный	низкий риск
висмут	безвреден	низкий риск

- картель и сердечники пуль.

И только около 1% — в припоях.

Никто не спорит с тем, что соединения свинца ядовиты. Постоянный контакт с солями или парами свинца способствует его накоплению в организме, что ведет к разрушению нервной системы и может отрицательно повлиять на кровеносную, эндокринную системы и почки. Но этот элемент не единственный, используемый в припоях. Не следует забывать, что и другие компоненты припоя тоже не безвредны (табл. 2).

И все же, какова доля припоев в загрязнении среды? Оказывается, основные источники загрязнения окружающей среды свинцом это:

- металлургические предприятия (более 100 тыс. тонн в год);
- выхлопные газы бензиновых автомобилей, использующих этилированный бензин (до 200 тыс. тонн в год);
- сточные воды промышленных предприятий (выброс в Мировой океан около 500 тыс. тонн в год);
- мусор, содержащий свинец (аккумуляторы в количествах, не поддающихся учету).

На фоне таких объемов загрязнений электронный хлам, содержащий припой на основе SnPb, составляет ничтожную долю. Но представляют ли они опасность? Чтобы ответить на этот вопрос, следует вспомнить, что металлический свинец химически мало активен. Свежая поверхность свинца быстро окисляется, образуя тончайшую окисную пленку PbO, предохраняющую его от дальнейшего окисления. Кислоты не растворяют свинец, поэтому в эле-

ктролизе его используют в качестве нерастворимого анода. Из-за инертности к окружающей среде многочисленные пробы грунтовых вод, взятые в 1998 году неподалеку от городских полигонов (свалок), не показали ни одного случая превышения норм содержания свинца [5].

Но все же, если бояться свинца в отработавшей свой срок электронной аппаратуре, то изъятие его из производства не единственный путь защиты окружающей среды. В некоторых странах нашли другой выход из сложившейся ситуации: утилизировать электронный хлам. Соответствующие законодательные инициативы приняты, в частности, в таких государствах, как Германия, Швейцария, Дания, Швеция, Норвегия, Япония. В этих странах владельцы электронных и электрических приборов могут вернуть их в точки розничной продажи или муниципальные пункты сбора мусора, откуда выработавшую свой ресурс аппаратуру отправляют в переработку, предусматривая необходимые защитные меры. Особенно успешно это практикуется в Германии, где и народ аккуратный, и за возвращенную аппаратуру предлагается маленькая компенсация.

В феврале 2003 года Европейский союз узаконил программу полного перехода на бессвинцовую технологию, начиная с июня 2006-го. С этой даты какие-либо свинецсодержащие продукты не должны ни производиться в Европе, ни ввозиться в нее. Вместе со свинцом вне закона объявлены ртуть, кадмий, шестивалентный хром, polybrominated biphenyls (PBB) и polybrominated diphenyl ethers (PBDE). Китай также рассматривает возможность принятия подобного решения с незначительными изменениями, иначе его электронные товары не разрешат ввозить на европейский рынок.

Под эту директиву не подпадает только производство особо ответственной аппаратуры (военной), связанной с поддержанием безопасности и жизнеобеспечения. Тем самым признается факт снижения надежности при использовании бессвинцовой пайки. И это понятно: печатные платы, компоненты, флюсы, подверженные высоким температурам пайки, испытывают большие термодинамические воздействия, которые могут провоцировать разрушения, дефекты и снижать надежность межсоединений. Динамику таких процессов можно оценить на основе известных представлений об ускорении процессов термодеструкции. С увеличением температуры на каждые 8 °C количество дефектов увеличивается вдвое.

Как нам в России относиться к бессвинцовым технологиям? Пока наша доля экспорта бытовой или индустриальной электроники настолько мала, что можно обойтись теми объемами продукции, которые выполнены по бессвинцовым технологиям контрактными производителями (FastWel, например). Кстати, на большую долю электроники, изготовленной в России, запреты Директивы RoHS не распространяются, так как данная аппаратура связана именно с сектором вооружений и системами безопасности. Что касается поступающих к нам из-за рубежа компонентов с покрытиями для бессвинцовой пайки, то большинство из них нейтрально к выбору

технологий пайки, а часть (применительно к эвтектическим припоям) требует практических исследований. Думается, любые статьи на эту тему, опубликованные российскими технологами, вызовут немалый интерес.

Компоненты, предназначенные для аппаратуры специального назначения, в нашу страну не поступали и поступать не будут. Зарубежные фирмы в этом не заинтересованы из-за малых объемов потребления российского рынка и эмбарго на поставку в Россию компонентов, относящихся к разряду специальных (по MIL-стандартам). Даже если бы такие поставки были организованы, они находились бы под тщательным контролем иностранных спецслужб, с чем вряд ли можно согласиться. Поэтому нам приходится довольствоваться в лучшем случае компонентами Industrial-исполнения, а они явно будут изготавливаться с применением бессвинцовых технологий.

Заключение

Автор полностью согласен с мнением Олега Пилипенко, выраженным на страницах предыдущего номера журнала. Но за пределами России переход к бессвинцовой технологии набирает темпы. Все более четко вырисовываются

ее контуры, скоро начнется этап международной стандартизации. Остановится ли данный процесс?

Российские экологи, к счастью, еще не присоединились к общемировой тенденции избавления электронного, электротехнического и автомобильного производства от свинца. Видимо, они понимают, что эта область использования свинца — капля в море по сравнению с общим потоком свинцовой грязи, отравляющей природу. А может, они осознают, что металлический свинец в припое и достаточно нейтрален, и доступен для утилизации. Вот почему в России нет резона прилагать гигантские усилия для перехода промышленности на бессвинцовую технологию.

Казалось бы, пока электронные продукты российского производства (кроме вооружения) не идут на экспорт, можно не беспокоиться. Но опасность подстерегает нас с другой стороны. Наступит время, когда компоненты с покрытиями под SnPb-припой закончатся, а импорт компонентов с бессвинцовыми покрытиями заставит нас что-то предпринимать. Затем прекратятся импортные поставки SnPb-припоев и флюсов для них. И если к этому моменту в России не произойдет импортозамещения компонентов пайки, нам волей-нево-

лей придется перейти на бессвинцовую технологию, несмотря на большие издержки и капиталовложения. Пора бы принимать решение. Только кто будет его принимать? ■

Литература

1. Медведев А. Бессвинцовые технологии монтажной пайки. Что нас ожидает? // Электронные компоненты. 2004. № 11.
2. The Black Pad Failure Mechanism — From Beginning to End/Ronald A.Bultwith, Michael Trosky, Louis Picehione, Darlene Hug/Cookson Electronics Assembly Materials Group — Alpha Metals, Global SMT and Packaging Journal, Sept. 2002.
3. J-STD-020-B. Стандарт для определения чувствительности к влаге в процессе пайки оплавлением негерметичных твердотельных компонентов для SMT-монтажа.
4. Медведев А. Требования к материалам и технологиям печатных плат при бессвинцовой пайке // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2006. № 2.
5. Григорьев В. Бессвинцовая технология — требование времени или прихоть законодателей от экологии? // Электронные компоненты. 2001. № 6.