

Паяемость выводов электронных компонентов

Проблема улучшения качества паяных соединений и повышения надежности изделий электроники вызывает необходимость применения эффективных методов контроля паяемости выводов электронных компонентов и финишных покрытий печатных плат. Методы должны обеспечивать автоматизацию контроля, высокую достоверность и возможность применения в промышленности для широкого круга электронных компонентов.

Владимир Ланин,
профессор

vlanin@bsuir.by

Выбор метода оценки паяемости

Проблемы формирования качественных паяных соединений в технологии электронных модулей имеют особую актуальность по целому ряду причин. Операции сборки и монтажа являются до сих пор самыми трудоемкими и занимают до 50–70% общей трудоемкости изготовления изделий. Микроминиатюризация электронных компонентов, применение поверхностного и комбинированного монтажа, создание функционально сложных микроэлектронных устройств, в частности, сверхбольших интегральных микросхем и быстродействующих микропроцессоров — все это вызывает особые трудности при формировании соединений.

Высокую функциональную сложность и степень интеграции невозможно реализовать без принципиального совершенствования системы контактных соединений. Освоение электронных сборок V поколения — многокристалльных модулей (тонкопленочных многослойных гибридных конструкций, выполненных на керамических, кремниевых или металлических подложках, к которым бескорпусные кристаллы присоединяются методами пайки) — повысило количество выводов в 100 раз по сравнению с технологией монтажа в отверстия [1]. Традиционные процессы монтажа не обеспечивают высокого процента выхода годных изделий с плотным монтажом. Статистические данные показывают, что 50–80% всех отказов в ИЭ происходит вследствие дефектов соединений, причем стоимость обнаружения и исправления отказа на этапе сборки блока обходится в 100 раз дешевле, чем при испытаниях аппаратуры [2]. Качество паяных соединений во многом зависит

от свойств покрытий деталей и выводов электронных компонентов.

Переход на бессвинцовые припои при монтаже электронных модулей ставит ряд задач по обеспечению хорошей смачиваемости поверхностей, оптимизации температурных профилей нагрева, контролю качества соединений. Обеспечение этих требований невозможно без разработки высокоэффективных и производительных методов контроля, особое место среди которых занимают методы контроля паяемости.

Паяемость — это способность материала смачиваться расплавленным припоем и образовывать с ним качественное паяное соединение. Паяемость определяется физико-химической природой материалов и припоя, способом и режимами пайки, флюсующими средами, условиями подготовки паяемых поверхностей и т. д. Для образования паяного соединения необходимо и достаточно смачивания поверхности металла расплавом припоя, что определяет возможность дальнейшего образования между ними химических связей. Паяное соединение должно иметь низкое переходное электрическое сопротивление, герметичность и требуемую прочность при различных условиях работы.

Паяемость выводов компонентов трудно оценить визуально, к тому же опыт показывает, что покрытия теряют паяемость при хранении. Постепенная диффузия меди в оловянное покрытие или припой приводит к образованию интерметаллических соединений, которые, увеличиваясь на паяемых поверхностях, вызывают отсутствие смачивания. Поэтому необходимо проверять паяемость таких поверхностей после хранения с целью обеспечения высокой надежности и выхода годных изделий на операциях пайки.

Для оценки паяемости предложены различные методы испытаний, которые можно подразделить на следующие виды: растекание припоя, погружение в припой, время смачивания, высота мениска и сила смачивания. Критическая оценка различных методов испытаний позволяет правильно выбрать материалы при пайке для получения высокой надежности соединений и обеспечить минимальный брак на операциях пайки (табл. 1).

Таблица 1. Методы испытаний на паяемость для электронных компонентов

Оцениваемый параметр	Площадь растекания припоя	Высота капли припоя	Время смачивания	Высота мениска	Сила смачивания
Информативность	■	■	■	■	■
Достоверность	□	■	□	□	■
Оперативность	□	□	□	□	■
Точность	□	□	□	□	■
Применимость для различных типов компонентов	□	□	■	■	■

Примечание. ■ — полное соответствие результатов; □ — неполное соответствие результатов

В методе на растекание припоя на тестовые образцы наносят определенный объем припоя и флюса, затем образцы нагревают до заданной температуры. Величина площади растекания припоя зависит от типа флюса, основного металла и состава припоя. После растекания припоя образец охлаждается. Площадь может быть измерена либо планиметром, либо увеличена на экране микроскопа для облегчения измерений и повышения их достоверности. Коэффициент растекания припоя по поверхности образца определяют как [3]:

$$K_p = S_p / S_0, \quad (1)$$

где S_p , S_0 — площади растекшегося припоя и дозированной заготовки припоя.

Если известна площадь растекания и объем припоя, то значение теоретического контактного угла капли припоя на поверхности определяют, используя выражение:

$$\vartheta = 7,12 V / \sqrt{S_p^3}, \quad (2)$$

где ϑ — угол в градусах; V — объем припоя.

Выражение предполагает, что объем припоя небольшой, гравитационное воздействие отсутствует и позволяет дать количественную оценку паяемости. Отличной паяемости соответствуют значения $\vartheta < 10^\circ$, $K_p > 1$, хорошей — $10^\circ < \vartheta < 25^\circ$, удовлетворительной — $\vartheta < 90^\circ$.

Величина контактного угла и площадь растекания зависят от массы заготовки припоя (рис. 1) [4]. Растекание припоя по поверхности образца часто носит неправильный характер вследствие неоднородности химических и физических свойств испытываемых поверхностей, а также различной степени их очистки. При испытаниях гальванических оловянных покрытий с толстыми оксидными пленками показано, что припой растекался под ними, что затрудняло контроль площади. Поэтому метод оценки площади растекания может дать значительную погрешность.

Разновидностью метода растекания является определение коэффициента растекания по максимальной высоте расплавленного припоя на поверхности:

$$K_p = (D - H_p) / D, \quad (3)$$

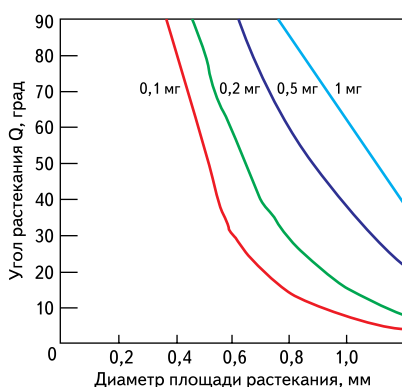


Рис. 1. Зависимость контактного угла от диаметра площади растекания и массы припоя

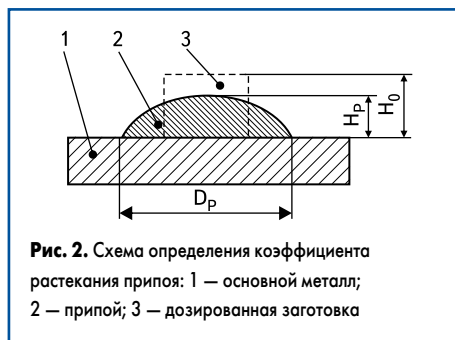


Рис. 2. Схема определения коэффициента растекания припоя: 1 — основной металл; 2 — припой; 3 — дозированная заготовка

где D — диаметр сферы, имеющий объем, эквивалентный используемому припою; H_p — высота капли припоя после растекания (рис. 2).

Однако этот метод больше подходит там, где площадь растекания припоя приблизительно круглая. Учитывая, что в реальных условиях пайки высота «лежащей» капли расплавленного припоя H_{np} всегда меньше диаметра гипотетической сферы припоя D и высоты дозы припоя H_p , то для более точного расчета коэффициента растекания припоя предложено выражение [5]:

$$K_p = (H_{np} - H_p) / H_{np}, \quad (4)$$

где H_{np} — высота «лежащей» капли расплавленного припоя, определяемая как:

$$H_{np} = \frac{\sqrt{2\sigma(1-\cos\theta)}}{\rho g}. \quad (5)$$

Здесь σ — поверхностное натяжение припоя, g — ускорение силы тяжести, ρ — плотность припоя.

Методы погружения являются наиболее ранними испытаниями на паяемость, поскольку выводы компонента просто погружаются сначала во флюс, а затем в расплавленный припой, и по степени покрытия их припоём оценивается паяемость. Выводы компонента с помощью установки (рис. 3) выдерживают в ванне 1–2 с, затем удаляют из ванны, охлаждают и очищают изопропиловым спиртом.

Значительное растекание припоя по длине вывода (на 95%) свидетельствует о хорошей паяемости (рис. 4), а образование шарика припоя с большими контактными углами — о плохой паяемости. Оставшиеся 5% несмоченной поверхности могут приходиться на поры и пустоты, при условии, если они концентрируются не в одном месте. Оценка результатов испытаний иногда затруднительна, поскольку недостаточно четко различаются грубые и ровные покрытия.



Рис. 4. Внешний вид выводов транзисторов после погружения в припой

Испытания на время смачивания позволяют воспроизводить довольно точно условия операции массовой пайки и могут быть использованы для определения качества пайки выводов элементов. Для проверки на паяемость материалов выводов электронных компонентов предложен метод шарика припоя (glob test). Определенный объем припоя (зависящий от размера испытываемого провода) расплавляется на нагретом блоке, а офлюсованный вывод горизонтально опускается в шарик припоя, расщепляя его надвое (рис. 5а). Время, в течение которого припой обтечет провод и в конечном итоге закроет верх провода, является временем смачивания. Для обнаружения тенденции к несмачиванию необходимо удалить провод из шарика припоя, стереть излишек припоя и повторить испытания. Для имитации длительного хранения выполняют искусственное старение в течение 16 часов при 155°C на воздухе.

На нагретый столик 1 укладывают дозу припоя, которая, расплавляясь, образует каплю 2. К капле подводят вывод 3, который делит ее на две части. По мере нагрева вывода припой начинает его смачивать и обтекать. В момент

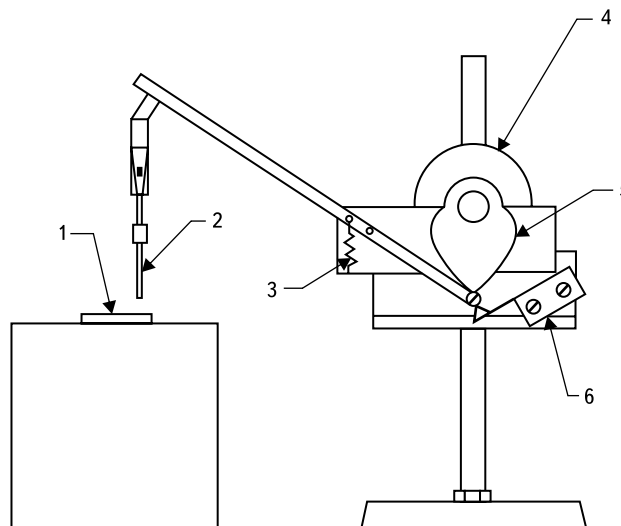


Рис. 3. Схема установки для погружения выводов компонентов в припой: 1 — ванна с припоём; 2 — компонент; 3 — возвратная пружина; 4 — двигатель; 5 — кулачок для задержки образца в припое; 6 — микровыключатель

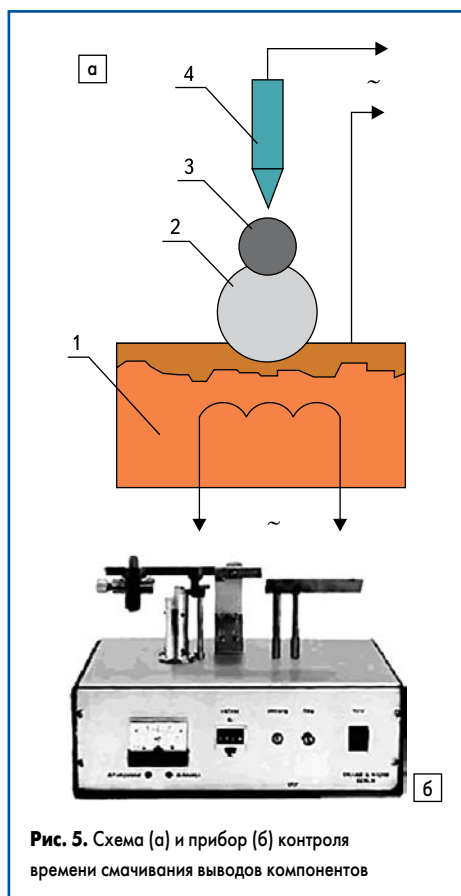


Рис. 5. Схема (а) и прибор (б) контроля времени смачивания выводов компонентов

полного смыкания над выводом припой касается зонда 4, и отсчет времени прекращается (рис. 5а). Такие приборы выпускаются фирмой Multicore (Великобритания) и Wazau (Германия) (рис. 5б).

Для определения паяемости выводов компонентов применяют более простой — менискометрический метод, заключающийся в измерении высоты мениска припоя, поднявшегося по выводу над зеркалом ванны под действием сил поверхностного натяжения. Высоту мениска над зеркалом припоя измеряют с помощью специальной оптической головки или бинокулярного микроскопа. Высота мениска обратно пропорциональна контактному углу смачивания. Чем больше высота мениска, тем лучше смачивание. Это следует из формулы [6]:

$$\sin \theta = \frac{g(\rho - \rho_{\phi})}{F_{\text{жф}}} \times \frac{H^2}{2}, \quad (6)$$

где ρ_{ϕ} — плотность флюса; H — высота мениска припоя на выводе, $F_{\text{жф}}$ — сила, действующая на границе «жидкий припой — флюс»; θ — угол смачивания.

Для измерения высоты мениска применяют установку, состоящую из миниатюрной ванны с припоем, сменных держателей для закрепления компонентов, микроскопа для замера высоты мениска, щупа для настройки микроскопа на уровень припоя и пульта управления. Ванну с припоем ПОС 61 разогревают до температуры 240...250 °С, время выдержки вывода в припой — 2–3 с в зависимости от диаметра вывода. Микроскоп устанавливают так, чтобы нулевая линия шкалы микроскопа располагалась между концом щупа и его изображением в зеркале припоя. После этого щуп удаляют

и закрепляют в держателе компонент, выводы которого перед испытанием рихтуют, обезжиривают растворителем и сушат.

По достижении рабочей температуры в ванне включают электродвигатель перемещения держателя и, наблюдая в микроскоп за мениском припоя на выводе, определяют по шкале микроскопа его высоту, по которой судят о паяемости (табл. 2).

Таблица 2. Оценка паяемости по высоте мениска припоя

Высота мениска припоя, мм	Оценка паяемости
0,95–0,65	Хорошая
0,55–0,40	Удовлетворительная
Менее 0,40	Неудовлетворительная

Менискометры фирмы Metronelec (Швейцария) имеют диапазон измерения высоты подъема мениска 0–1,5 мм с погрешностью $\pm 0,05$ мм. Производительность контроля — до 30 шт./ч. Оценка паяемости выводов по высоте мениска трудоемка и имеет значительную погрешность.

Смачивание поверхности расплавленным припоем сопровождается постепенным уменьшением контактного угла по мере изменения в силе поверхностного натяжения вследствие взаимодействия припоя и основного металла. Следовательно, измеряя поверхностное натяжение припоя, можно оценить паяемость. Метод баланса смачивания (Wetting Balance Test) состоит в прямом измерении сил смачивания и работы адгезии. Исследуемый образец 1, закрепленный на датчике 2, погружается в ванну с припоем 7, которая с помощью привода 6, управляемого системой 5, движется вверх (рис. 6а). Датчик тензометрического типа преобразует усилие в электрический сигнал, который через тензометрический усилитель 3 подается на самописец 4.

Пока образец не нагрет, смачивание отсутствует, мениск припоя вогнут вниз, на образец действует только выталкивающая сила припоя F :

$$F_a = S \times h \times g, \quad (7)$$

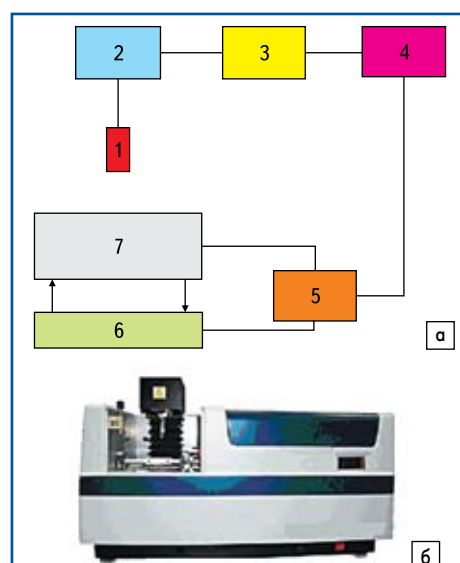


Рис. 6. Схема (а) и прибор (б) менискографического контроля

где S — площадь образца, h — глубина погружения.

При полном смачивании в точке В значение силы смачивания равно F_1 , при отрыве образца в точке С сила смачивания достигает F_2 (рис. 7). Скорость погружения образцов выбирается в пределах 0,2–0,4 мм/с, время погружения 4–5 с, глубина — 0,8–2,0 мм. Мерой паяемости служат сила F_1 и время t_1 , за которое она достигает этого значения. Косинус краевого угла смачивания находят по формуле:

$$\cos \theta = (F_1 + F_a) / F_2. \quad (8)$$

Процесс смачивания носит релаксационный характер, и изменение силы смачивания описывается уравнением [7]:

$$f = f_0 \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) \right], \quad (9)$$

где f_0 — натяжение смачивания, равное максимальному значению силы смачивания на единицу длины периметра нижнего торца образца; τ — время релаксации смачивания; t — время, отсчитываемое от момента контакта образца с расплавом.

Время релаксации τ определяют как время достижения силы смачивания, равной $[(e-1)/e]f_0$. Величина натяжения смачивания:

$$f_0 = \sigma \cos \theta. \quad (10)$$

Этот метод введен в европейские и международные стандарты (MIL, DIN, JIN, IPC) и применяется для оценки паяемости разнообразных покрытий, образцов печатных плат, выводных и чиповых компонентов, эффективности активированных флюсов и бессвинцовых припоев.

Менискографы выпускаются фирмами Metronelec (Швейцария) и General Electric (Англия). Менискограф MeniscoST60 Wetting Balance (рис. 6б) обеспечивает глубину погружения образцов в расплав припоя от 0,1 до 1,0 мм с шагом 0,1 мм со скоростью от 1 до 50 мм/с. Время выдержки и наблюдения составляет от 1 до 30 с. Хорошей смачиваемости соответствуют значения поверхностного натяжения припоя от 350 до 450 мН/м, а менее 200 мН/м указывает на неудовлетворительную паяемость. Тензометрический метод контроля паяемости позволяет изучать процессы длительностью не менее 1×10^{-3} с с чувствительностью 5×10^{-5} Н. Точность измерения f_0 составляет $\pm (2-3)\%$, τ — $\pm 5\%$, точность расчета краевого угла смачивания θ — $\pm 1^\circ$, σ — $\pm (4-5)\%$.

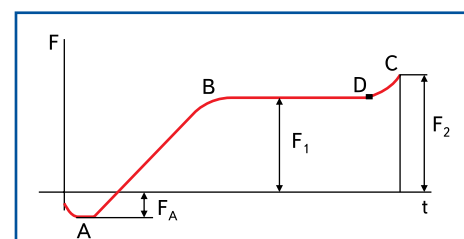


Рис. 7. Кривая менискографического контроля силы смачивания

Значения натяжения смачивания оловянно-свинцовым припоем для различных типов покрытий приведены в таблице 3 [8].

Параметры смачивания безвыводных электронных компонентов поверхностного монтажа, а именно их контактных площадок, оцененные менискографическим методом, зависят от типа барьерного слоя и качества слоя лужения. Время смачивания находится в пределах 0,5–2,0 с, а натяжение смачивания — в пределах 400–440 мН/м [9].

Методика испытаний выводов на паяемость с помощью менискографа также имеет некоторые недостатки. Время смачивания связано со скоростью погружения образца в припой и зависит от ряда факторов: массы образца, теплопроводности материала, активности флюса, состояния поверхности торца образца и других. В результате данные по силе смачивания и времени смачивания могут не коррелировать или даже противоречить друг другу.

Таблица 3. Параметры смачивания покрытий оловянно-свинцовым припоем

Покрытие (медный подслоя)	Натяжение смачивания, мН/м
Золото 99,99	270
Золото – олово (80)	140
Золото – серебро (68)	200
Золото – медь (70)	400
Палладий	450
Родий	100
Олово химическое	480
Олово электрохимическое матовое	480
Олово электрохимическое блестящее	270
Никель химический	260
Никель гальванический	280
Никель гальванический блестящий	240
Никель – фосфор (90)	200
Никель – бор	150
Олово – никель (70)	60
Олово – свинец (60)	480

Предложена методика и прибор оценки паяемости по обобщенному параметру, в качестве которого взята площадь петли гистерезиса смачивания (рис. 8), имеющая размерность работы. Эта работа, отнесенная к единице облуженной поверхности образца, получила название «работа облуживания» $W_{обл}$. Для получения петли гистерезиса после достижения заданной глубины погружения движение образца реверсируют и при этом регистрируют когезионную силу [10]. Параметры смачивания различных поверхностей в присутствии флюса ФКСп приведены в таблице 4. Снижение натяжения смачивания и увеличение работы облуживания свидетельствует об ухудшении паяемости поверхности.

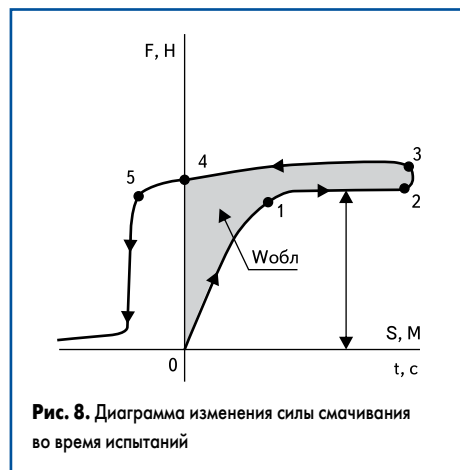
Таблица 5. Параметры смачиваемости оловянных сплавов

Тип сплава	Со свинцом		Без свинца		Без свинца	
	Sn-Pb-Ag		Sn-Ag-Cu		Sn-Ag	
Температура плавления, °C	179		217		221	
Температура в печи, °C	245	260	245	260	245	260
Натяжение смачивания, мН/м	311	304	315	319	307	345
Время смачивания, мс	8	7	460*	10	720*	124*

Примечание. * Большие энергозатраты на нагрев из-за длительной смачиваемости.

Таблица 4. Параметры смачивания оловянно-свинцовым припоем ПОС 61

Параметр	Латунь Л63	Медь	Золото	Серебро
Натяжение смачивания, мН/м	238	221	260	165
Время смачивания, с	1,0	1,6	1,0	2,5
Работа облуживания, Дж/м ²	0,12	0,27	0,135	0,25



Лучше всего смачиваются припоем оловянные химические и матовые покрытия. Гальванические блестящие покрытия отличаются высокой чистотой поверхности, что значительно увеличивает время релаксации смачивания. Наличие до 3% фосфора в никелевом химическом покрытии, а также его пористость обуславливают некоторое замедление смачивания и увеличение краевого угла до 58° [11].

Хорошей паяемостью обладают золотое и серебряное покрытия, а также покрытия Pd, Sn-Pb и Au-Cu. По никелевым сплавам спиртоканифольные флюсы имеют низкую активность, а также образуют трудно удаляемые остатки на паяемых поверхностях. Для увеличения активности по медным и никелевым поверхностям необходимо использовать активированные флюсы на основе этиленгликоля, содержащие поверхностно-активные вещества и активаторы в виде щавелевой кислоты и гидрохлоридов, производных бензиламина. Такие флюсы обладают в 1,6–2 раза большей активностью, чем флюс ФКСп, а его остатки легко удаляются с поверхности деталей промывкой в теплой проточной воде.

Существенным отличием свинцовых и бессвинцовых сплавов является их время смачиваемости (табл. 5) [12]. Время смачиваемости сплава Sn-Pb-Ag при температуре 245 °C составляет 8 мс. При увеличении температуры на 15 °C время смачиваемости уменьшится

всего до 7 мс. Время смачиваемости SAC при температуре 245 °C составляет 460 мс, а при температуре 260 °C оно резко уменьшается до 10 мс. Более длительное время смачиваемости требует более длительного и интенсивного нагрева, что увеличивает энергозатраты. Необходимо использовать более мощные печи с двумя зонами пикового нагрева.

Исследования параметров смачивания наиболее распространенными бессвинцовыми припоями — Sn-3,4Ag-4,8Bi, Sn-4,0Ag-0,5Cu, Sn-3,5-Ag и Sn-0,7Cu — поверхностей печатных плат показало, что на свежеприготовленных образцах сила смачивания составляет 4,7–5,2 мН, а время смачивания — 2–3 с. После двух циклов нагрева в связи с ростом оксидной пленки SnO₂ сила смачивания снижается до 2 мН, а время смачивания растет до 8–10 с [12]. Сравнение параметров смачивания оловянными припоями различных финишных покрытий печатных плат (лужение, NiAu, серебрение и органическое паяемое покрытие (OSP)) приведено в таблице 6.

Таблица 6. Сравнение параметров смачивания оловянными припоями покрытий печатных плат

Припой	Максимальная сила смачивания	Время смачивания
Sn37Pb	Sn > Ag > OSP > NiAu*	Sn = Ag > OSP = NiAu
Sn3,4Ag4,8Bi	Sn > Ag > NiAu > OSP	Sn = Ag = NiAu > OSP
Sn3,8Ag0,7Cu	Ag > NiAu > Sn > OSP	Sn > NiAu > Ag > OSP
Sn3,5Ag	Ag > NiAu > Sn > OSP	Ag = NiAu = Sn > OSP
Sn0,7Cu	Sn > NiAu > Ag > OSP	NiAu > Sn = Ag > OSP

Примечание. * Лучше > хуже.

В бессвинцовом процессе флюс должен обеспечить смачиваемость наиболее трудно смачиваемых припоев и металлических поверхностей контактных площадок и компонентов при более высокой температуре, поэтому его активность должна быть выше. Более активный флюс уменьшает число оксидов и улучшает смачиваемость.

Выводы

Для обеспечения высокого качества паяных соединений в электронике необходимы совершенные и оперативные методы контроля паяемости выводов и контактных площадок электронных компонентов. Современный метод баланса сил смачивания припоями позволяет объективно и достаточно точно оценить паяемость выводов различных типов электронных компонентов, финишных покрытий контактных площадок для различных припоев и флюсов при заданной температуре формирования соединений. Этот метод может успешно применяться в промышленности, что позволяет значительно сократить брак после пайки.

Литература

1. Ли Н.-Ч. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и flip-chip технологии. М.: ИД «Технологии», 2006.

2. Manko H. H. Solders and Soldering: materials, design, production and analysis for reliable bonding. N. Y., 2000.
3. ГОСТ 23904-79. Пайка. Метод определения смачивания материалов припоем.
4. Wassink K. R. J. Soldering in Electronics. Ayr, Scotland, Electrochem. Publ., 2002.
5. Ланин В. Л., Хмыль А. А. Контроль паяемости выводов элементов радиоэлектронной аппаратуры // Неразрушающий контроль и системы управления качеством сварных и паяных соединений. Материалы семинара. М.: ЦРДЗ, 1992.
6. Городецкая М. С., Казаков Н. И. Метод оценки паяемости выводов электрорадиоэлементов и микросхем // Обмен опытом в радиопромышленности. 1982. Вып. 11.
7. Бородина Е. К., Крашениников М. Г. Контроль паяемости металлических покрытий // Заводская лаборатория. 1989. Т. 53. № 11.
8. Груев И. Д., Матвеев Н. И., Сергеева Н. Г. Электрохимические покрытия изделий радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1988.
9. Becker G. Solderability Testing of Surface-Mount Devices // Electronic Packaging and Production. 1987. V. 27. No 10.
10. Подлесных В. Г., Ткачев М. А., Радковский С. Г. Контроль паяемости по обобщающему параметру // Электронная техника. Сер. 7. 1981. Вып. 3.
11. Емельянов В. А., Ланин В. Л., Кушнер Л. К., Хмыль А. А. Оценка паяемости гальванических покрытий токопроводящих элементов электронной аппаратуры // Электронная техника. Сер. 7. 1990. Вып. 3.
12. Левданский А. Изменение технологического процесса при переходе на бессвинцовую пайку // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 1.
13. Sattiraju S. V., Dang B., Johnson R. W., Li Y., Smith J. S., Bozack M. J. Wetting Characteristics of Pb-Free Solder Alloys and PWB Finishes // IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing. 2002. Vol. 25. No 3.