

Надежно-ориентированное производство аппаратуры специального назначения

Проектирование электронной аппаратуры с учетом физических моделей деградации позволяет предусмотреть выбор надежно-ориентированных проектных решений. Долговременный опыт проектирования, испытаний аппаратуры, предназначенной для экстремальных условий эксплуатации, позволил выявить механизмы типичных отказов, на основе которых можно осуществлять осознанный выбор конструктивных и технологических решений, ориентированный на обеспечение требуемого уровня надежности с учетом дестабилизирующих факторов внешних воздействий.

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

medvedevam@bk.ru

Введение

Проектирование современной электронной аппаратуры связано с разрешением противоречий между предельными возможностями технологий и постоянно растущими требованиями к увеличению плотности компоновки и уровню надежности элементов межсоединений.

В данной публикации рассматриваются лишь конструктивно-технологические решения, которые обеспечивают надежность электрических межсоединений (из-за них происходит примерно 30% отказов аппаратуры). Для предотвращения отказов приходится принимать во внимание вопросы оценки уровня производства, критерии выбора конструктивных и технологических материалов, решать проблемы обеспечения надежности функционирования согласованных линий связи, учитывать механизмы отказов соединений и изоляции и предусматривать меры их предотвращения, учитывая критерии оценки качества при технологическом контроле и испытаниях.

Необходимость постоянного роста плотности межсоединений (по мере увеличения степени интеграции элементной базы) потребовала разрешения противоречий между предельными возможностями технологий производства и необходимостью уменьшения размеров элементов межсоединений. При этом множество и миниатюрность элементов межсоединений значительно усложняют решение проблемы обеспечения их надежности, если уже на начальных этапах проектирования не предупредить ошибки в выборе конструктивных и технологических решений.

Для удовлетворения всего комплекса требований к системе межсоединений электронной аппаратуры, построенной на высокоинтегрированной элементной базе, используются многослойные печатные

платы (МПП) как единственное средство увеличения плотности компоновки интегральных микросхем за счет специализации слоев в трехмерной многослойной структуре. Это позволяет значительно сократить длины межэлементных связей, сформировать согласованные линии связи и тем самым улучшить временные характеристики распространения сигналов в трассах межсоединений.

Экспертиза производства

Одно из неперемных условий конструктивно-технологического обеспечения надежности межсоединений в МПП — правильно рассчитанные размеры элементов совмещения в трехмерных структурах соединений. Основанные на этом критерии модели расчетов базируются на определении статистического распределения точек, в которых могут находиться металлизированные отверстия с учетом производственных погрешностей. Это распределение находится в непосредственной зависимости от технической вооруженности производства и используемых в нем материалов.

На основе вероятностной модели анализа и расчета операционных и суммарных погрешностей совмещения элементов соединений могут критически оцениваться выбранные проектные решения, либо может выбираться производство для реализации проекта по критерию «производственная надежность»:

$$q = \frac{A - \sum M(\Delta_i)}{\sqrt{\varepsilon^2 (\Delta_i) + A^2_{\text{П}}}},$$

где A — суммарная погрешность совмещения элементов — параметр, характеризующий класс точ-

ности производства; $M(\Delta_i)$ и $\varepsilon^2(\Delta_i)$ — математическое ожидание и дисперсии суммарного распределения погрешностей, вызванных размерной нестабильностью используемых в производстве материалов; A_{II} — сумма дисперсий позиционных погрешностей системы базирования и используемого в производстве оборудования. Значение результирующего параметра q определяется долей допустимых дефектов и возможных отказов в общем числе элементов межсоединений.

Применение прецизионного станочного парка, систем экспонирования, безбазовой системы совмещения типа MASS-LAM, инженерное обеспечение производственных помещений стабильной температурой и влажностью позволяют реализовать проектные нормы совмещения (диаметр контактной площадки минус диаметр сверления) 0,25 мм.

Выбор материалов

В производстве печатных плат используют основания из композиционных материалов, состоящих из армирующих компонентов и связующего.

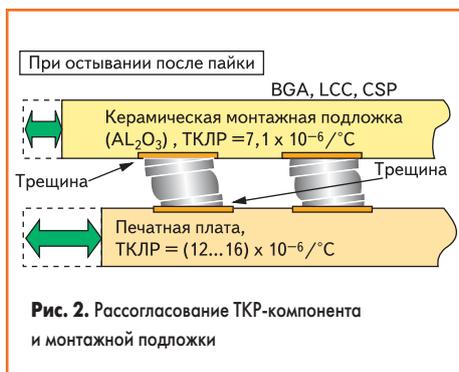
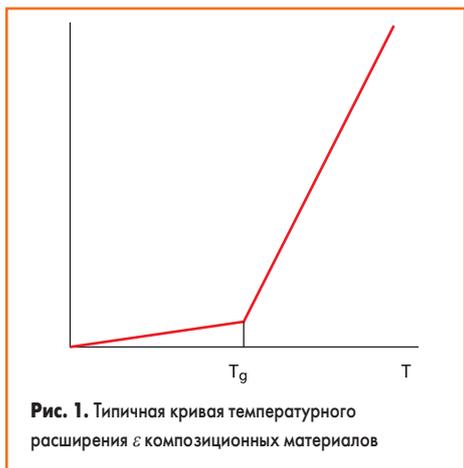
Цели использования армирующих компонентов:

- придать основаниям жесткость и прочность;
- увеличить нагревостойкость и прочность при температурах паяк;
- выровнять с металлами температурные коэффициенты расширения (ТКР).

Сравнительные характеристики ТКР, 10^{-6} град $^{-1}$:

Медь	17
Эпоксидная смола	300
Алюмоборосиликатное стекло (наполнитель стеклопластика)	8
Результирующее значение ТКР стеклоэпоксидной композиции	20
Керамический корпус БИС	12
Пластмассовый корпус ИС	80

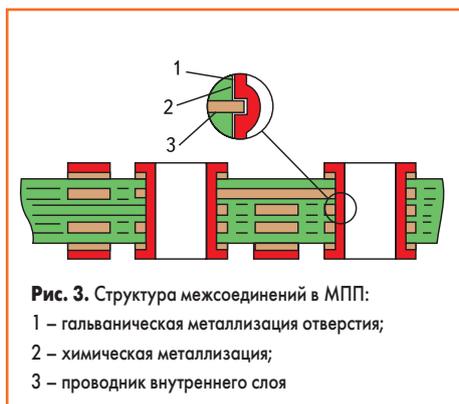
Эпоксидные смолы, как и другие полимеры, при нагреве расширяются особенно интенсивно после температуры перехода T_g (температуры стеклования) (рис. 1). Отечественные стеклопластики и большая часть импортных имеют $T_g = 100-110$ °С. При пайке они настолько расширяются, что могут ослабить металлизацию сквозных отверстий. Специальные сорта импортных материалов,



в частности материалы группы FR-4, начинают интенсивное расширение только после 150–180 °С, то есть при температурах, близких к пайке. В связи с этим для печатных плат повышенной надежности вынуждены применять материалы с повышенной температурой перехода (рис. 2).

Надежность межсоединений в МПП

Элементы электрических соединений в МПП по потенциальной надежности делятся на три группы (рис. 3):



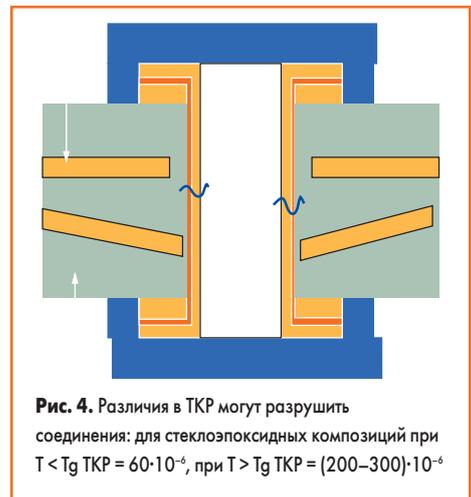
- печатные проводники в плоскости основания платы, осуществляющие продольные соединения в слоях в ортогональных направлениях X и Y;
- металлизированные отверстия, выполняющие роль трансверсальных соединений в направлении Z;
- внутренние соединения печатных проводников внутренних слоев с металлизацией сквозных отверстий.

Совокупность трансверсальных и внутренних элементов соединений составляют межслойные соединения МПП.

Элементы соединений подвергаются воздействию термических нагрузок в процессе изготовления (при оплавлении металлорезиста или горячем облуживании монтажных элементов), монтажа (пайки) и циклических изменений температур в процессе эксплуатации. Различия в линейных расширениях металлических элементов проводящих структур и композиционного диэлектрика вызывают в элементах электрических соединений термомеханические напряжения. В продольных направлениях, армированных стеклотканью, различия в расширениях незначительны, так что они не сказываются на прочности соединений продольной структуры, если выполне-

ны условия пространственного совмещения элементов, оговоренные ранее.

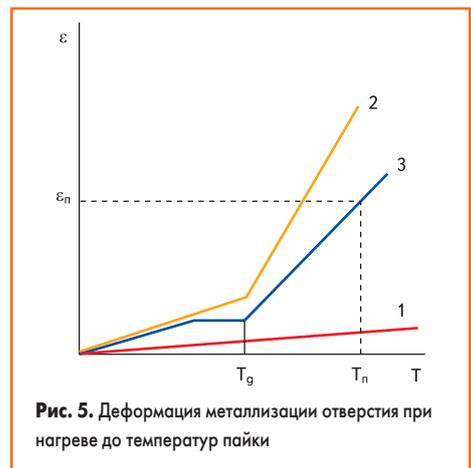
В трансверсальном направлении, перпендикулярном плоскости армирования, различия в линейном расширении настолько значительны (17×10^{-6} для меди и 300×10^{-6} для диэлектрического основания), что возникающие при температурных нагрузках термомеханические напряжения часто становятся причиной разрушения межслойных соединений (рис. 4).



Устойчивость металлизированных отверстий к термомеханическим нагрузкам обеспечивается прочностью (толщиной) и пластичностью металлизации при температурах пайки, так что, если уровень термомеханических напряжений превосходит определенный предел, в металлизации отверстий и во внутреннем соединении металлизации с внутренним слоем возникают ослабления, которые со временем приводят к отказам.

При низкой пластичности металлизации расширяющийся диэлектрик может сдвинуться относительно металлизации стенок отверстий и разгерметизировать стык внутреннего соединения. Диффундирующий в объем МПП атмосферный кислород постепенно окислит поверхности стыка, образуя окись-закаись меди, обладающая вентильным эффектом, приведет к сбоям ЭВМ, а затем к полному отказу.

Распространяющийся сейчас процесс прямой металлизации существенно увеличивает прочность внутренних соединений, поскольку он обеспечивает отсутствие в этом месте



каких-либо прослоек, за счет чего создаются условия эпитаксиального роста металлизации от фольги внутреннего слоя.

На рис. 5 показаны кривые расширения меди (1), диэлектрика (2) и принудительной деформации металлизации сквозных отверстий (3). Деформация металлизации при использовании материала основания с большей температурой перехода была бы значительно меньше, потому что его температура перехода T_g была бы гораздо ближе к температуре пайки T_{II} .

Меры обеспечения надежности соединений

На основании описанных механизмов отказов соединений можно сформулировать следующие конструктивно-технологические меры, предупреждающие срабатывание этих механизмов:

- повышение прочности и пластичности металлизации отверстий за счет использования электролитов со специальными выравнивающими и пластифицирующими добавками;
- использование высокоэффективных методов подготовки стенок сквозных отверстий под металлизацию, чтобы обеспечить высокую прочность внутренних соединений;
- выбор материалов изоляционных оснований МПП, имеющих коэффициент расширения, близкий к меди, и температуру перехода, близкую к температуре пайки;
- переход на процесс прямой металлизации;
- преимущественное использование поверхностного монтажа электронных компонентов, создающее меньшие температурные нагрузки на металлизированные отверстия, чем пайка элементов со штыревыми выводами.

Уровень пластичности меди — 6%. Уровень, достигаемый с использованием специальных добавок — 16%.

Эффективность технологических мер повышения надежности соединений подтверждается термоциклическими испытаниями МПП в диапазоне температур от комнатной до +265 °С. МПП, сконструированные и изготовленные с учетом вышеописанных мер, выдерживают без сбоев 25 таких термоциклов, что по некоторым стандартам соответствует ресурсу, равному 10 годам.

Статистический анализ отказов аппаратуры доказывает, что переход на поверхностный монтаж увеличивает надежность межсоединений в МПП по крайней мере на три порядка.

Механизмы отказов электрической изоляции

Для современной электронной аппаратуры, отличающейся низким уровнем рабочего напряжения, характерны электрохимические формы отказов электрической изоляции. Развитие электрохимических процессов обусловливается наличием дефектов изоляции

(быстрые процессы разрушения) или предшествующими процессами деградации композиционных материалов и лаковых покрытий, в основном составляющих элементы электроизоляционных конструкций печатного монтажа (медленные процессы).

При большой плотности печатного монтажа, характерной для бортовой аппаратуры, малозаметные ионно-генные или жировые загрязнения создают достаточно ощутимую вероятность ослабления изоляции.

При отсутствии грубых дефектов, выявляемых при контроле, деградация диэлектриков печатного монтажа проходит две стадии. На первой стадии происходит расщепление композиционного основания печатной платы, отделение защитных покрытий от поверхностей платы. В местах разрушений начинается электромеханический перенос металла проводников в изоляционный зазор, который завершается формированием металлических перемычек. Короткое замыкание цепей питания может явиться причиной возгорания плат.

В связи с возможностью таких отказов в качестве базовых материалов используют самогорящиеся или не возгорающиеся материалы электроизоляционных конструкций.

Процессы деградации показаны на рис. 6 на примере изменения сопротивления изоляции во времени при различных рабочих температурах и фиксированной влажности. Повышение температуры испытаний в данном случае является ускоряющим фактором отказов. Например, для фольгированного стеклотекстолита установлено, что при температуре 273, 358 и 343 К время составляет соответственно 96, 490 и 980 ч, а при 40 и 25 °С оно равно соответственно 8000 и 24 000 ч.

Аппроксимация результатов испытаний при повышенных температурах на рабочий диапазон температур, подобная показанной на рис. 7, для ряда других электроизоляцион-

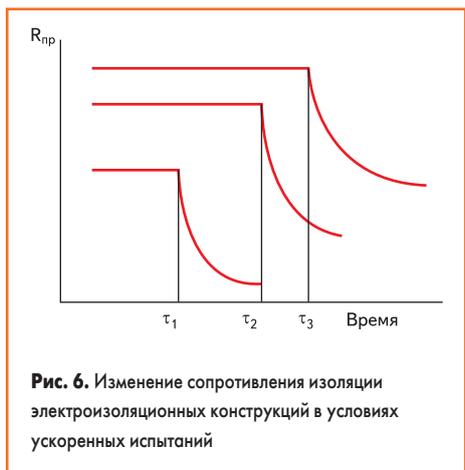


Рис. 6. Изменение сопротивления изоляции электроизоляционных конструкций в условиях ускоренных испытаний

ных материалов позволяет установить рабочий ресурс, например, для рабочей температуры 65 °С:

Стеклоэпоксидная композиция FR-4	12 лет
Лак УР-231 (60 °С)	8 лет
Стеклоэпоксидная композиция СТФ	2,4 года
Паяльные маски фирмы Du Pont	10 лет



Рис. 7. Аппроксимация результатов ускоренных испытаний на рабочий диапазон температур

Если заданный ресурс аппаратуры превышает ресурс материалов, целесообразно проводить профилактический осмотр плат и при необходимости — ремонт электроизоляционной конструкции или замену электронных устройств.

Выбор технологий электроизоляционных защитных покрытий

Традиционный метод защиты поверхности электронных ячеек — покрытие лаками. Из отечественных лаков хорошо зарекомендовал себя в многолетней практике электроизоляционный лак УР-231. Этот лак создает гидрофобные поверхности с хорошим диффузионным барьером для влаги и служит поэтому влагозащитным покрытием. Однако лаки, стекая с острых кромок печатных проводников, выводов и т. п., не создают нужной укрывистости поверхности смонтированных плат. Постепенное загрязнение поверхности лака лишает его гидрофобности и может привести к поверхностным утечкам и электрохимическому отказу.

Более эффективная защита создается технологией конденсационного осаждения электроизоляционных пленок на основе полипаракилилена (парилена). Тонкое, механически прочное покрытие париленом осаждается в первую очередь на острые кромки металлических элементов и ровно покрывает все поверхности. Пленка толщиной порядка 8 мкм достаточна для эффективной влагозащиты. Она не создает заметного теплового сопротивления, когда это требуется для кондуктивного теплоотвода.

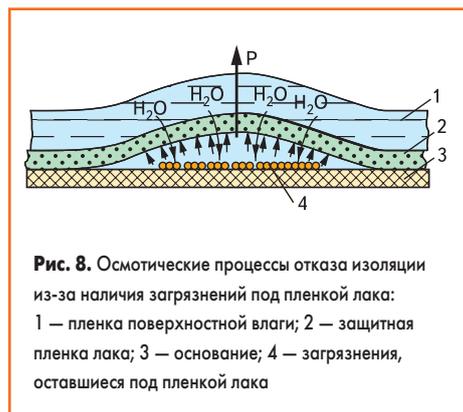


Рис. 8. Осмотические процессы отказа изоляции из-за наличия загрязнений под пленкой лака: 1 — пленка поверхностной влаги; 2 — защитная пленка лака; 3 — основание; 4 — загрязнения, оставшиеся под пленкой лака

Все поверхности, на которые наносятся пленочные покрытия, предварительно должны быть очищены от поверхностных и объемных загрязнений. Даже микроскопические остатки загрязнений под пленкой провоцируют осмотические процессы отслоения лака и последующий отказ ячеек (рис. 8).

Такого рода отслоения, наполненные осмотическим раствором, неизбежно провоцируют электромиграционные процессы отказа изоляции (рис. 9).



Рис. 9. Электромиграция меди в изоляционный зазор, завершающаяся коротким замыканием и калильным возгоранием

Если рассматривать условия загрязнений и очистки электронных ячеек, то можно установить следующие неблагоприятные факторы:

- жидкий или расплавленный флюс непосредственно после нагрева пайкой всасывается в объем пористого диэлектрического основания платы, откуда удаление его отмыжкой в растворителях крайне затруднено;
- интенсификация процесса отмыжки ячеек ограничена низкой устойчивостью электронных компонентов ячейки к технологическому воздействию ультразвука или вибраций.

В связи с этим получает распространение технология нанесения защитных покрытий на плату перед монтажом.

Защитные покрытия на печатные платы наносят одним из трех методов:

- трафаретной печатью. Разрешающая способность этого метода (0,3 мм) недостаточна для современной элементной базы;
- нагревостойким пленочным фоторезистом. Этот метод не создает достаточного повто-

рения рельефа плат, создаваемого печатными проводниками;

- нагревостойким жидким фоторезистом с последующим удалением пробельных мест методами фотолитографии. В сочетании с хорошей укрывистостью этот метод обладает хорошей разрешающей способностью, позволяющей нанести изоляционные покрытия в узкие пространства между выводами БИС и СБИС с шагом 0,5 мм. Покрытия на основе жидкого фоторезиста после проявления запекаются и создают прочную паяльную маску, защищающую поверхность печатных плат от технологических воздействий при пайке и от внешних воздействий в составе аппаратуры.

Выбор металлопокрытий под пайку (финишные покрытия)

Финишные покрытия под пайку имеют небольшое разнообразие (таблица) и в основном характеризуют своеобразие поставщиков компонентов. В связи с переходом зарубежья на технологии бессвинцовой пайки появились соответствующие покрытия типа e1, e2, e5, e6, e7. Для пайки оловянно-свинцовыми припоями в технологиях спецаппаратуры пригодны только покрытия типа e3 и e4. Это приходится учитывать при оформлении заказа на компоненты. Из-за неуверенности в нужных поставках предприятия вынуждены вводить входной контроль на паяемость компонентов с использованием специальной техники.

Металлопокрытия на печатных платах для спецаппаратуры требуют анализа для выбора. Варианты для выбора:

- металлорезист на основе гальванически осажденного олова-свинца неоплавляемого (OC15) — торцы печатных проводников остаются медными (без покрытия);
- то же при горячем оплавлении (OC15 *опл.*) — торцы медных проводников облуживаются;
- металлические (медные) элементы печатного монтажа без покрытий с последующим горячим облуживанием монтажных элементов через перфорации паяльной маски (медь + гор. ПОС) — медные проводники под паяльной маской остаются без металлопокрытия;
- металлорезист на основе двуслойного покрытия: никель (6 мкм) + золото (1–3 мкм) — Нб3л3 — торцы печатных проводников остаются медными (без покрытия);

- иммерсионное покрытие медных поверхностей печатных элементов тонким слоем золота, порядка 0,3 мкм (имм. зол.) по подслою химникеля — все поверхности проводников укрыты иммерсионным золотом;
- иммерсионное покрытие оловом с барьерным подслоем из органического металла, сохраняющего способность к пайке в течение длительного времени.

Конечно, такое разнообразие покрытий — дань времени. Но в новых условиях целесообразно использовать для пайки иммерсионные покрытия, предпочтительно иммерсионное олово с барьерным подслоем.

Контроль и испытания МПП

ГОСТ 23752 содержит полный набор требований к контролю и испытаниям печатных плат, в том числе обязательный 100-процентный автоматизированный контроль правильности монтажных соединений и разобщений. Однако предложенные стандартом виды контроля и испытаний относятся к функциональным. Они не выявляют ослабленных элементов, способных в будущем ускоренно деградировать и отказывать.

Поэтому для гарантии обеспечения высокого уровня надежности электронных модулей необходимо и возможно вводить дополнительные (диагностические) виды контроля:

- контроль омического сопротивления внутренних соединений в МПП методом «трех точек»;
- металлографический анализ межслойных переходов по микрошлифам технологического поля каждой платы;
- проверка электрической прочности изоляции между цепями (слоями) питания;
- 100-процентный электрический контроль цепей после всех воздействий при проведении периодических испытаний;
- многократные циклические термоудары тест-плат для проверки технологического обеспечения прочности межсоединений.

Технологическое обеспечение надежности паяных соединений

Необходимые для надежности механические и физико-химические свойства паяных соединений (ПС) обеспечиваются качеством припоя, выбором флюса, режима и термического профиля пайки, подготовкой спаиваемых поверхностей. Эти условия легче выполнить в автоматах пайки, в которых программно выполняется профиль нагрева монтируемой ячейки и нейтральная среда (азот), предотвращающая образование окислов на активированных поверхностях, подготовленных к пайке. Однородность и повторяемость выполняемых программой режимов пайки в таких автоматах позволяет проводить выборочный разрушающий контроль паек на технологических элементах (например, металлографический анализ), однозначно характеризующий качество всех паек в рабочей зоне ячейки. Надежность ПС (λ -характери-

Таблица.

Маркировка	Категория	Тип материала
e1	Олово/серебро/медь	SnAgCu и вариации
e2	Другие бессвинцовые припои (без висмута)	SnCu, SnAg, SnAgCuX
e3	Лужение оловом (все формы)	Чистое олово (Sn)
e4	Предварительно покрытые материалы	Au, NiPd, NiPd Au
e5	Содержащий цинк	Ti/Zn=SnZn (без Bi) или вариации
e6	Содержащий висмут	Материалы с висмутом
e6	Содержащий индий	Материалы, содержащие индий

стика), выполненных в таких условиях производства, значительно выше обычных:

в обычных условиях производства	10^{-8}
в производстве с аттестованным персоналом и инструментом на автоматах	10^{-10}
с программным управлением	10^{-12}
в нейтральной среде (в среде азота)	10^{-13}
с выбраковкой по результатам неразрушающего контроля	10^{-14}

Дополнительные меры обеспечения повышенной надежности ПС

Припой должен контролироваться и корректироваться каждые 10 часов работы для предотвращения образования шлама, искажения эвтектики и удаления растворимых в припое примесей.

Поверхность припоя в ванне пайки должна быть защищена нагревостойкой жидкостью для уменьшения поверхностного натяжения расплавленного припоя.

Для уменьшения термомеханических напряжений в ПС температуру пайки целесообразно держать на уровне 20°C над температурой плавления эвтектики. Для ПОС-61 это $210\text{--}220^\circ\text{C}$. Для активации поверхностей при таких относительно низких температурах пайки вынуждены использовать специальный бесканифольный водосмываемый флюс.

При наладке (отработке) технологии пайки электронных модулей целесообразно проводить ряд испытаний для подтверждения технологического обеспечения надежности ПС:

- **Оценка качества ПС по признакам внешнего вида.** К критериям внешнего вида относятся состояние поверхности припоя, величина угла смачивания и степень заполнения паяного шва припоем. Определение качества ПС по внешним признакам качества производится на бинокулярных микроскопах при увеличении в 16–50 раз. Яркость паяного соединения обеспечивается режимом затвердевания припоя, исключающим газы включения в ПС. Блестящая поверхность паек говорит о его мелкозернистости, что достигается быстрым охлаждением ПС. При внешнем осмотре можно увидеть холодный или смещенный спай, избыток или недостаток припоя, короткозамыкающие ПС. Угол смачивания (зависит от степени активации поверхностей) и степень заполнения паяного шва — показатели, характеризующие правильность выбора флюсов, припоя, режима пайки и качество подготовки поверхности основных металлов. Качественные ПС имеют угол смачивания не более 5° .
- **Металлографический анализ диффузионной зоны ПС.** При перегреве (по температуре и времени) происходит глубокая взаимная диффузия основного металла и припоя, а паяное соединение становится непечным из-за образования интерметаллоидов. При недогреве глубина взаимной диффузии оказывается незначительной, что характеризует незавершенность формирования ПС. При перегреве зона интерметаллоидов утолщается и за счет его хрупкости прочность соединений падает (рис. 10).



Рис. 10. Изменение прочности паяного соединения в зависимости от толщины интерметаллического слоя

- **Оценка прочности.** Критериями оценки качества являются величина усилия разрыва ПС и устойчивость ПС при воздействии знакопеременных нагрузок (вибрациях). При отлаженном технологическом процессе пайки остается обязательным контроль ПС по признакам внешнего вида при 11–32-кратном увеличении с использованием бинокулярного микроскопа или проектора. При соблюдении этих условий сборочно-монтажного производства можно ожидать, что надежность паек (λ -характеристика) будет порядка 10^{-14} (при доверительной вероятности 0,95).

Инженерное обеспечение производства электроники

Приближение норм проектирования электронных изделий к уровню микроэлектроники обусловило необходимость обеспечения соответствующих им условий производства по температуре, влажности, обеспыленности и др. Зачастую, задаваясь целью создать производство высокого класса точности, ограничиваются инвестициями в обновление оборудования, но не учитывают, что увеличение разрешения рисунка сопровождается воспроизведением частиц пыли, а на точности позиционирования сказываются и температура, и влажность в помещении, и виброзащитность оборудования. Часто в строительном-монтажных проектах производства электроники закладываются ослабленные требования к инженерному обеспечению в связи с ограниченными финансовыми возможностями. Но в конечном итоге это существенно сказывается на эффективности производства: снижении выхода годных, больших трудозатратах на обнаружение и исправление брака, уменьшении уровня надежности из-за неизбежного пропуска дефектов или близких к ним ослаблений соединений.

Для достижения высокого технического уровня печатных плат недостаточно укомплектовать производство прецизионным оборудованием, обязательным становится дополнительное инженерное обеспечение условий производства — создание гермозон с контролируемой атмосферой по запыленности, температуре и влажности.

К условиям инженерного обеспечения современного производства относят много факторов, первостепенными из которых являются:

- Степень чистоты воздуха производственных помещений, оцениваемая концентрацией взвешенных частиц.
- Время восстановления чистоты помещения до исходного уровня после кратковременного превышения допустимого значения.
- Расход воздуха (кратность воздухообмена).
- Скорость воздушного потока.
- Однородность скорости воздушного потока.
- Однонаправленность воздушного потока.
- Избыточное давление воздуха.
- Номинальная температура воздуха.
- Точность поддержания заданного значения температуры.
- Относительная влажность воздуха.
- Точность поддержания заданного значения температуры.
- Уровень акустических шумов.
- Освещенность.
- Аэроионизация воздуха.
- Уровень вибрации.
- Напряженность электрических полей.
- Напряженность магнитных полей.

Международный стандарт ИСО 14644 (Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды) и соответствующий ему межгосударственный стандарт ГОСТ ИСО 14644 содержат исчерпывающую информацию по обеспечению чистоты воздуха по концентрации взвешенных частиц в чистых помещениях.

Чистое помещение — дорогостоящее сооружение, стоимость которого возрастает с увеличением уровня чистоты. Поэтому класс чистоты назначают, соотносясь с заданной точностью воспроизведения рисунка по ГОСТ 23751.

Заключение

Описанные в статье положения — только малая часть используемой методологии инженерных решений обеспечения надежности и руководств на конструирование аппаратуры для экстремальных условий эксплуатации. Использование этих положений создает только предпосылки обеспечения нужного уровня надежности. Производство представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных работ, при выполнении которых необходим учет разносторонних требований к конструкции, знанию современной технологии, элементной базы, схмотехники, сопротивления материалов и практики надежности и других теоретических и прикладных дисциплин.

Особенно важно вооружить производство системами диагностики и физического анализа дефектов и отказов. Чем достовернее будут результаты анализа, тем более правильные решения будут приняты для корректировки конструкций, технологий и организации системы обеспечения качества.