

# Лаборатория анализа качества электронной аппаратуры

А. Медведев, д. т. н.<sup>1</sup>

УДК 621.38:620.1.05 | ВАК 05.27.06

Отказы вследствие неисправных электронных компонентов и печатных плат обходятся дорого. Предотвратить их либо как минимум значительно уменьшить их последствия заблаговременно, еще в ходе производственного процесса, позволяет всесторонний углубленный контроль качества. Лаборатории анализа дефектов и отказов аппаратуры сегодня – необходимый атрибут предприятия, заботящегося о высоком уровне надежности своей продукции. Комплекс современных технических средств и методик, дополняющий традиционные проверки, закрепленные в стандартах, открывает новые возможности для более тонкого анализа характерных дефектов производства, построения моделей разрушений слабых мест и отработки конструкции и технологии для улучшения надежности электронных устройств.

**В** настоящее время в ответственной аппаратуре для получения оптимального сочетания функциональности, производительности и надежности повсеместно начинают использовать решения, направленные на дальнейшее повышение плотности ее компоновки: микрочипы, технология chip-on-chip и др. Не прекращается также тенденция уменьшения геометрических размеров электронных систем. Всё это приводит к увеличению количества компонентов на единице площади печатной платы, а значит, к росту количества межсоединений, требований к их надежности и электрической изоляции между ними. Практика показывает, что именно эти элементы конструкции электронной аппаратуры стали сегодня одной из основных причин ее отказов в процессе эксплуатации.

В стандарте ГОСТ 23752.1 [1] предписан определенный набор средств для контроля качества печатных плат в процессе приемосдаточных и периодических испытаний. Однако эти средства далеко не всегда дают возможность выявить скрытые производственные дефекты, способные вызвать отказы в процессе длительной эксплуатации. Поэтому предприятия, ставящие перед собой задачу стабильного выпуска высоконадежной продукции, организуют по собственной технологической документации аналитические лаборатории для постоянного контроля состояния своего технологического процесса. Хорошо оборудованная лаборатория такого назначения обычно имеет в своем составе аппаратуру для спектроскопических исследований, микроскопии (в том числе металлографии), интроскопии и термографии.

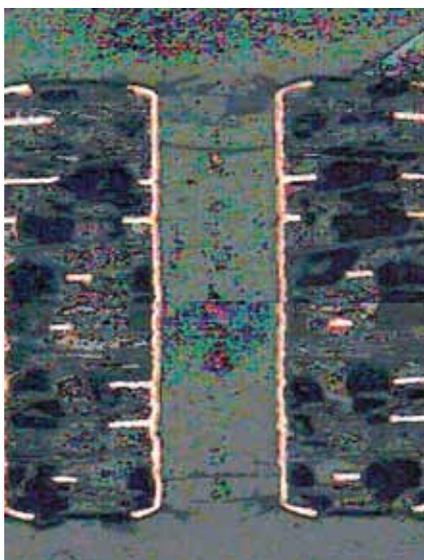
## СПЕКТРОСКОПИЯ

Методы Фурье-спектроскопии в лабораториях электронных производств применяются для обнаружения слабых остатков веществ и исследования их химического состава. Они позволяют выявлять и идентифицировать загрязнения, которые не наблюдаются в оптический микроскоп и малоразличимы при использовании методов, предлагаемых государственными стандартами. Между тем, такие слабые остатки способны привести к отказам в разных элементах конструкции печатной платы.

Например, уровень очистки поверхностей печатных плат от остатков технологических загрязнений становится основополагающим для влагозащиты аппаратуры, поскольку, как оказалось [2], все без исключения влагозащитные покрытия влагопроницаемы, и только стерильно чистые поверхности под лаком устойчивы к воздействию влаги [3]. Это становится особенно важным в связи с продолжающейся миниатюризацией и уменьшением энергоемкости сложных электронных узлов [4]. Наличие малейших следов загрязнений поверхности печатных плат неизбежно приводит к появлению токов утечки и, как следствие, к процессам образования токопроводящих мостиков за счет электрохимической миграции [5]. Наилучшим методом неразрушающего выявления трудно наблюдаемых загрязнений на поверхности печатной платы, который дает возможность определить их происхождение, на сегодня можно считать инфракрасную Фурье-спектрометрию.

Еще одна подобная проблема, решаемая средствами спектроскопии, связана с загрязнением припоев. Подробное изучение состава припоев простыми оптическими методами становится недостаточным, поскольку вредные примеси в них либо только частично видимы, либо обнаруживаются не все из них. Требования к надежности

<sup>1</sup> МАИ (НИУ), профессор, medvedevam@bk.ru.



**Рис. 1.**  
Металлографический шлиф металлизированного отверстия после нагрева до температур пайки



**Рис. 2.** Начало разрыва соединения внутреннего слоя МПП с металлизацией отверстия

аппаратуры повышаются, качество элементов межсоединений должно быть гарантировано во всех точках системы, а этих элементов становится всё больше, их размеры уменьшаются. Если в 60-х годах прошлого века считалась достаточной наработка на отказ ( $\lambda$ -характеристика) паек  $10^{-8}$  час $^{-1}$ , то сегодня требуется уже  $10^{-12}$  час $^{-1}$ . Точный анализ состава припоев лучше всего выполняется средствами рентгено-спектрального флуоресцентного анализа [6]; они же являются наилучшим решением при оценке качества подготовки монтажной поверхности – другого важнейшего аспекта обеспечения надежности паяного соединения.

## МИКРОСКОПИЯ

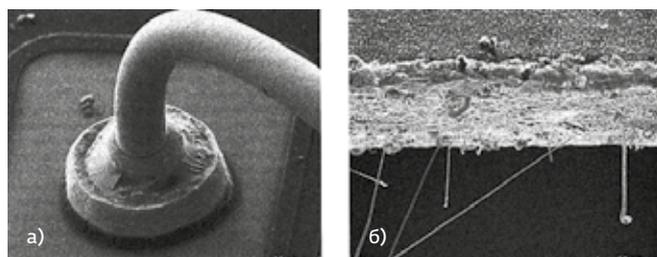
Обычные оптические микроскопы широко распространены на участках технического контроля и в лабораториях электронных производств. В составе комплекта оборудования для металлографического анализа [7] микроскопы позволяют увидеть, как деформируются элементы межсоединений в многослойных структурах печатных плат (рис. 1) и как может порваться внутреннее соединение в многослойных печатных платах (рис. 2). При анализе качества паяных соединений микроскоп позволяет определить, какой толщины образовалось интерметаллическое соединение: при толщине, меньшей критического значения, процесс пайки считается незавершенным, а при слишком большой толщине интерметаллида пайка оценивается как ненадежная.

Однако перманентная миниатюризация делает оптические микроскопы недостаточно информативными для отработки технологий и управления качеством производственных процессов. Значительно более полную информацию о состоянии межсоединений дают сканирующие микроскопы – в первую очередь потому, что у них отсутствует эффект уменьшения резкости деталей объекта в зависимости от их расположения относительно фокуса

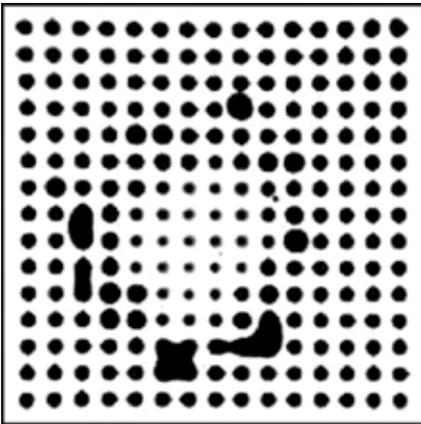
объектива; кроме того, они способны давать значительно большую степень увеличения. На рис. 3 приведены примеры высококачественных изображений, полученных на сканирующем микроскопе при оценке микросварного соединения и при наблюдении «усов», образовавшихся из оловосодержащего покрытия на печатной плате [8].

## ИНТРОСКОПИЯ

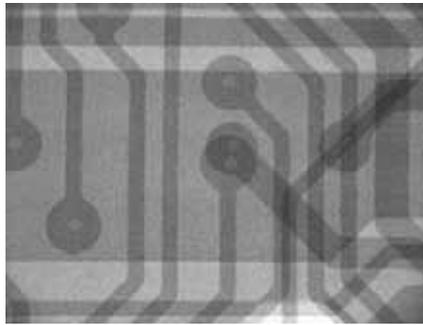
Рентгеновское изображение и ультразвуковое сканирование – средства интроскопии, особенно востребованные для обнаружения внутренних неоднородностей в проводниковых структурах (рентген) и электроизоляционных конструкциях (ультразвук). Анализ состояния невидимых для визуального осмотра неоднородностей – предвестников отказов – может в значительной степени повлиять на улучшение производственных процессов. Наиболее характерна необходимость применения рентгеновской аппаратуры для оценки качества паек BGA-компонентов в связи с тем, что их шариковые выводы расположены под корпусом, а их дефекты, а также дефекты их пайки, невозможно обнаружить никаким иным способом, кроме применения методов рентгеновской интроскопии (рис. 4). Для этой цели сегодня



**Рис. 3.** Фотографии, полученные на сканирующем микроскопе: а – микросварное соединение; б – образование «усов» из оловосодержащего покрытия



**Рис. 4.**  
Рентгеновское изображение паек под корпусом BGA-компонента



**Рис. 5.**  
Рентгеновское изображение внутренних слоев многослойной печатной платы

разрабатываются программы, реализующие автоматическую оценку качества паек шариковых выводов [9].

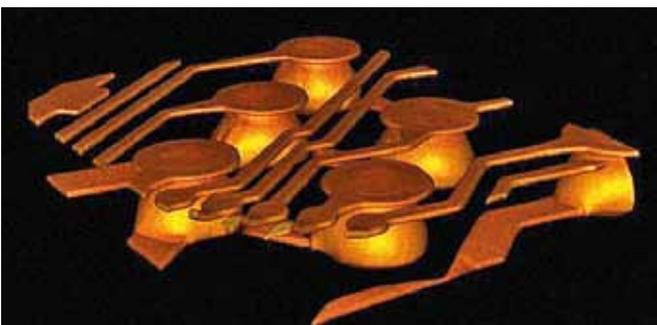
Под рентгеном можно увидеть точность совмещения элементов межсоединений в многослойных печатных платах (рис. 5).

Еще более мощный инструмент исследования – рентгеновская компьютерная томография, которая позволяет увидеть срезы объекта в любой плоскости, что дает ей большую информативность (рис. 6).

### ТЕРМОГРАФИЯ

Важными характеристиками поведения диэлектрических оснований печатных плат являются показатели их термической устойчивости. Необходимость в оценке этих характеристик обусловлена в первую очередь групповым нагревом плат в процессе пайки компонентов поверхностного монтажа [10]. Немаловажна для обеспечения надежности и устойчивости печатных плат к термоциклам, неизбежно возникающим в процессе эксплуатации аппаратуры.

Стандарты предусматривают испытания материалов и печатных плат при термических воздействиях [10], но не затрагивают первопричины их поведения в технологическом и эксплуатационном температурных диапазонах. Эта задача решается в ходе термографических исследований таких характеристик материалов, как температура стеклования  $T_g$  и температура термодеструкции  $T_d$  [11].



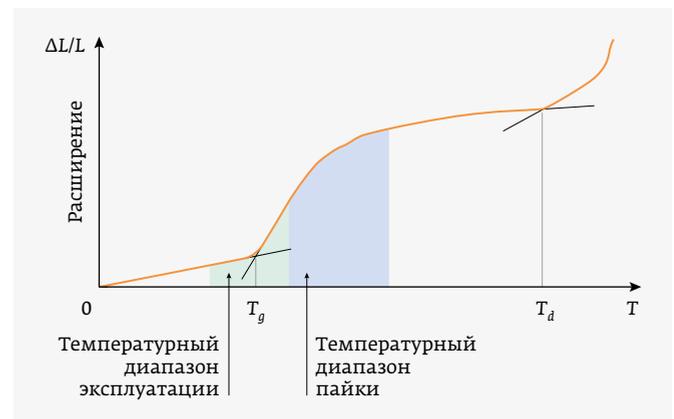
**Рис. 6.** Томография межсоединений в двусторонней плате

Нас интересует в первую очередь термомеханический анализ (ТМА), состоящий в определении зависимости относительного расширения материала от температуры. Характерными показателями в данном случае являются изломы кривой, отображающей эту зависимость, в точках  $T_g$  и  $T_d$  (рис. 7). После достижения температуры стеклования  $T_g$  диэлектрическое основание начинает интенсивно расширяться ( $\Delta L/L > 200$  град<sup>-1</sup>), что многократно превосходит расширение меди ( $\Delta L/L > 17$  град<sup>-1</sup>) и может приводить к разрушению металлизации отверстий и внутренних соединений МПП [11].

По результатам ТМА зарубежные поставщики фольгированных материалов указывают  $T_g$ . Как правило, чем выше  $T_g$  материала, тем он дороже, так что материалы группы FR-4, имеющие  $T_g$  порядка 135–140 °С, гораздо дешевле материалов FR-5 с  $T_g$  порядка 170–180 °С.

Отсутствие ТМА на входном контроле базовых материалов часто приводит к недоразумениям в производстве печатных плат, когда платы из новой партии материалов неожиданно «плывут, как свечи», при термической сушке, предусмотренной стандартными режимами температур, или недопустимо коробятся при пайке.

Приборы для ТМА дорогие и сложные в эксплуатации, поэтому их могут иметь редкие лаборатории экспертного



**Рис. 7.** Типичная термографическая характеристика печатной платы:  $T_g$  – температура стеклования,  $T_d$  – температура термодеструкции

анализа [12]. Проще в использовании и дешевле приборы термогравиметрического анализа, но и информативность они обеспечивают намного меньшую, чем та, которую дает ТМА.

## ЛАБОРАТОРИЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Рекомендуемые типы проверок, состав и назначение технических средств лаборатории приведены в табл. 1.

Передовые предприятия, владеющие средствами металлографии, электрического тестирования, интроскопии, термомеханического анализа, в своем понимании проблем

контроля качества продвинулись так далеко, что обнаружили, что и этих средств зачастую оказывается недостаточно для достоверного выявления причин отказов. Их специалистами была осознана потребность в более тонком анализе состояния электронной аппаратуры во всех ее элементах: электронных компонентах, печатных платах, паяных соединениях, разъемах, влагозащите, радиационной стойкости и т. п. Для этого предприятие должно иметь лабораторию, располагающую, кроме перечисленных выше, целым рядом дополнительных средств контроля качества электронных устройств [13–21], которые позволяли бы глубоко и всесторонне решать следующие задачи:

**Таблица 1.** Состав и назначение технических средств лаборатории анализа качества электронной аппаратуры

Вид тестирования	Контрольная аппаратура	Уровень сборочной единицы		
		печатные платы	печатные узлы (электронные модули)	блоки
Функциональный контроль межсоединений	Тестеры с контактирующими устройствами типа «летающие щупы»	Проверка монтажных соединений («прозвонка»)	—	—
Функциональный контроль работоспособности аппаратуры	Тестеры с сигнатурным анализом типа J-Tag	—	Проверка работоспособности электронных модулей	Проверка работоспособности электронных модулей и блока в целом
Параметрический контроль	Тестеры с контактирующими устройствами типа «летающие щупы»	Проверка качества соединений и изоляции разобщений	Внутрисхемное тестирование: проверка межсоединений и состояния электронных компонентов	Проверка межузловых соединений в блоке и состояния электронных модулей
Диагностический контроль	Находится в разработке в МАИ [14]	Прогнозирование надежности межсоединений	Углубленный внутрисхемный контроль, в том числе с использованием дополнительных внешних воздействий	
Металлографический анализ	Комплект металлографического оборудования: машина для микрошлифов, металлографический микроскоп, оснастка для заливки шлифов	Анализ качества внутренних межсоединений в многослойных печатных платах	Анализ качества паяных соединений	Анализ качества непаяных соединений и разъемов
Реологический анализ	Лабораторная разрывная машина	Анализ адгезии фольги к диэлектрическому основанию печатных плат. Анализ пластичности металлизации отверстий	Анализ прочности паяных соединений	Анализ прочности непаяных соединений (пресс-фит)

Таблица 1. Продолжение

Вид тестирования	Контрольная аппаратура	Уровень сборочной единицы		
		печатные платы	печатные узлы (электронные модули)	блоки
Термографический анализ	Термомеханический анализатор	Определение температуры стеклования базовых материалов на входном контроле	Определение термоустойчивости неметаллических деталей	Определение термоустойчивости неметаллических деталей
Рентгеновская интроскопия	Узкофокусный рентгеновский аппарат	Определение точности пространственного совмещения элементов в многослойных платах	Определение качества паяных соединений, недоступных для визуального контроля (типа BGA)	Определение качества непаяных соединений
Электрическая кондуктометрия	Измеритель микро-сопротивлений. Тераомметры	Определение качества элементов межсоединений. Определение качества электроизоляционных конструкций	Поиск неисправностей межсоединений в электронных модулях	Поиск неисправностей межсоединений в электронных блоках
Микроскопия	Биноклярный микроскоп. Биноклярный визиометр. Микроскоп высокого увеличения с документированием объекта наблюдения. Сканирующий микроскоп	Микроскопический контроль печатных плат по признакам внешнего вида	Микроскопический контроль печатных узлов по признакам внешнего вида	Микроскопический контроль элементов конструкций электронных блоков по признакам внешнего вида
Измерение загрязнений	Кондуктометр. Гидростат	Определение степени очистки поверхности печатных плат	Определение степени очистки поверхности печатных узлов после пайки	Определение степени очистки поверхности электронных блоков после сборки
Препарирование объекта исследования для анализа дефектов и отказов	Рабочее место монтажника (набор инструментов для монтажа-демонтажа электронных компонентов), тестеры, инструмент для препарирования объектов анализа	Анализ дефектов и отказавших элементов печатных плат	Анализ дефектов и отказавших элементов печатных узлов	Анализ дефектов и отказавших элементов электронных блоков
Функциональный контроль ВЧ-трактов	Рефлектометр	Анализ линий передач высокочастотных сигналов	Анализ параметров линий передач высокочастотных сигналов	Анализ параметров линий передач высокочастотных сигналов

- входной контроль базовых материалов;
- анализ состояния технологии производства электронной аппаратуры;
- анализ дефектов печатных плат, печатных узлов (электронных модулей), электронных блоков;
- анализ причин отказов электронной аппаратуры.

В оснащение такой лаборатории должны входить:

- оборудование, реализующее термомеханический метод исследования полимеров, позволяющий определить температуры стеклования и деструкции базовых материалов;
- разрывные машины для определения пластичности гальванически осажденной меди в отверстиях печатных плат;
- машины для определения прочности паек на срез;
- гидростат для экспертного определения чистоты отмывки плат от технологических загрязнений;
- средства для пайки при проведении всевозможных анализов;
- электрические измерительные приборы для испытаний электрической изоляции и проводимости;
- средства функционального, параметрического и диагностического контроля электронных средств: печатных плат, печатных узлов и блоков.

Как показывает практика, такой состав оборудования позволяет объективно оценить надежность электронных устройств и доказательно выявить «узкие места» технологического процесса, устранение которых многократно снижает вероятность появления производственных дефектов, приводящих к отказам аппаратуры в процессе ее эксплуатации.

\* \* \*

Средства глубокого анализа состояния всех элементов электронной аппаратуры – это глаза и уши технолога и конструктора в деле определения степени совершенства разработки и производства в части обеспечения качества и надежности продукции и технологического процесса. Обидно слышать от руководства: «Делайте хорошо, и вам не потребуются ваши лаборатории. Нет денег на ваши забавы!» Такая точка зрения не имеет права на существование, поскольку оценить, соответствуют ли результаты производства критерию «делайте хорошо», можно только при помощи аппаратуры, позволяющей всесторонне изучить качество изделия, достоверно диагностировать уровень его надежности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 23752.1. Платы печатные. Методы испытаний.
2. **Левкина Н., Ванцов С., Медведев А.** Влагозащитные покрытия печатных плат // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 7. С. 124–129.
3. **Медведев А., Боданов А.** Эффективность влагозащиты печатных узлов // Технологии в электронной промышленности. 2018. № 5. С. 56–59.
4. **Медведев А., Мылов Г.** Надежность электрических межсоединений в электронных сборках авионики // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 9. С. 12–18.
5. **Медведев А.** Печатные платы. Электрохимические процессы деградации изоляции // Технологии в электронной промышленности. 2013. № 1. С. 16–18.
6. **Грибков М., Медведев А., Мылов Г., Сержантов А.** Рентгеноспектральный флюоресцентный анализ в производстве электроники // Производство электроники. Технологии, оборудование, материалы. 2009. №6. С. 48–52.
7. **Анчевский И., Медведев А.** Металлографический анализ многослойных печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 2. С. 35–37.
8. **Деген Д.** Пустоты в компонентах с контактными площадками на нижней стороне корпуса // Технологии в электронной промышленности. 2018. № 6. С. 70–72.
9. **Тазитдинов И.** Эффективный метод поиска дефектов монтажа электронных компонентов в корпусах типа BGA // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 6. С. 148–153.
10. ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции.
11. **Медведев А.** Печатные платы. Температурные свойства базовых материалов // Производство электроники. Технологии, оборудование, материалы. 2011. № 4. С. 1–6.
12. **Schindler A.** Smart Thermal Analysis (Part I): Automatic Evaluation of DSC, TGA and STA Measurements // Direct Industry, the online industry exhibition. 2018. September 07.
13. **Медведев А., Бекишев А.** Входной контроль компонентов // Компоненты и технологии. 2008. № 10. С. 84–87.
14. **Васильев Ф., Медведев А., Сокольский А.** Диагностический контроль электрических соединений в авионике // Практическая силовая электроника. 2013. № 1. С. 42–44.
15. **Медведев А.** Исследование термических нагрузок на композиционные материалы авионики // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 2. С. 74–80.
16. **Медведев А.** Сопоставительные испытания покрытий под монтажную пайку // Компетентность. 2016. № 6. С. 48–51.
17. **Медведев А.** Модели усталостных разрушений паяных соединений // Производство электроники. Технологии, оборудование, материалы. 2007. № 2. С. 1–4.
18. **Мейлицев В.** Сертификационные испытания – единственный объективный способ подтверждения качества ЭКБ // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 5. С. 62–71.
19. Investigating damage on assemblies for quality assurance // Electronics Production and Test. 2018. № 11. PP. 72–74.
20. **Васильев Ф., Медведев А.** Надежность печатных узлов авионики // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 2. С. 23–26.
21. **Медведев А., Мылов Г.** Современные требования к электронным сборкам // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 10. С. 32–40.