

Внутренний враг не пройдет, или как повысить надежность паяных соединений

А. Гаранин¹, А. Маурин²

УДК 621.791.3 | ВАК 05.27.06

Скрытые дефекты, возникающие в процессе производства печатных плат, могут стать причиной преждевременного выхода из строя аппаратуры. Качество паяных соединений во многом определяет надежность электронного оборудования, работающего в условиях воздействия неблагоприятных факторов внешней среды. Одним из самых распространенных видов дефектов в паяных соединениях являются пустоты, представляющие собой микроскопические пузырьки воздуха, которые появляются при оплавлении печатных плат. В статье рассмотрены эффективные методы обнаружения скрытых пустот в припое и показано, как с помощью вакуумного модуля, встраиваемого в печь оплавления, можно существенно улучшить качество паяных соединений.

Электронные устройства, эксплуатируемые в тяжелых условиях, необходимо защищать от вредных воздействий внешней среды, ведь нельзя представить себе печатную плату, открытую всем ветрам и ударам стихий, будь то Арктика или пустыня, соленое море или горный перевал. Даже в спокойном и сугубо мирном городском пейзаже электронный модуль зачастую трудится в непрерывном стрессе, если находится в составе телекоммуникационного или силового оборудования. Предположим, что мы добились надежной внешней защиты нашего устройства. Но не только извне может угрожать опасность.

Отказ наступит, казалось бы, защищенное изделие внезапно и в самый неподходящий момент, когда нагрузка и необходимость бесперебойной работы будут особенно велики. Там, где прибор встретится с частыми перепадами температур, ускорений, вибрацией, обязательно проявятся, скрытые до времени, дефекты паяных соединений. Разрыв цепи, выход из строя и... Останется лишь надеяться, что такой дефект не приведет к аварии или катастрофе (рис. 1). К сожалению, продолжают множиться печальные вести о внезапных отказах электронного оборудования.

В результате, если речь идет об ответственных применениях изделий, связанных с выполнением важных задач, гражданских или военных, подобную угрозу нельзя считать несущественной.

Причина недостаточной прочности контактов и проблем с качеством зачастую заключается в том, что в паяном соединении одного или нескольких элементов образуются микроскопические пузырьки воздуха, которые невозможно обнаружить стандартными способами проверки. Добиться того, чтобы такие пустоты не появлялись в процессе оплавления довольно сложно. Да, опытный технолог, затратив массу драгоценного времени, сможет отрегулировать процесс производства так, чтобы результат был близок к идеалу. Беда в том, что этот результат не будет устойчив, ведь поверхностный



Рис. 1. Последствия брака пайки

¹ ООО «Новые технологии», технический директор, garanin@nt-smt.ru.

² ООО «Новые технологии», коммерческий директор, maurin@nt-smt.ru.

монтаж становится местом встречи многих предшествующих операций, каждая из которых, скорее всего, находится вне пределов контроля вашего предприятия. При входной проверке можно обнаружить только самые грубые нарушения качества поступающих плат, комплектующих и паяльной пасты, а взаимное влияние небольших отклонений, которые всегда вероятны, выявить не так просто. Построение же процедур входного контроля может быть чрезвычайно трудоемкой задачей (рис. 2) [1].

Могут оказаться неэффективными также вибрационные и климатические испытания, на которые многие возлагают большие надежды. Эти проверки делаются изредка, а то и одноразово, чтобы подтвердить качество «образцового экземпляра». Если же вас серьезно беспокоит качество всех будущих изделий, выполненных по технологии поверхностного монтажа, придется найти более надежный способ защиты.

Прежде всего, следует выбрать метод контроля, который однозначно определит состояние внутренней структуры паяного соединения. Тут не справятся ни визуальный, ни автоматизированный оптический контроль, ни даже тестирование на стенде, ведь засевший внутри соединения пузырек воздуха может и не оказать значимого влияния на электрические характеристики.

Каким же образом можно проверить качество монтажа компонентов на печатную плату? Особенно тех компонентов, выводы и теплоотводы которых скрыты от взгляда пытливого инженера? Например, микросхем в корпусах BGA и QFN?

В соответствии с отечественными стандартами в паяном соединении пустот не должно быть более 25% от общего объема паяного соединения [2]. Иначе существенно усиливается их пагубное влияние, как было определено при проведении серий испытаний методами термоциклирования и термоударов [3]. Если более пристально рассмотреть места локализации пустот внутри шариковых контактов, то самым опасным является расположение пустот в местах соединения шарикового контакта и площадки печатной платы. Стандарт IPC 7095 говорит, что в этом случае общий диаметр пустот не должен превышать 20% от диаметра шарикового контакта при оценке по самому строгому классу III [4].

Изучив стандарт, мы узнаем, что номинальный диаметр контакта для самого миниатюрного компонента составляет 150 мкм [5]. Это значит, что современная система рентгеновского контроля с микрофокусным источником справится с задачей контроля качества оплавления самых миниатюрных компонентов.

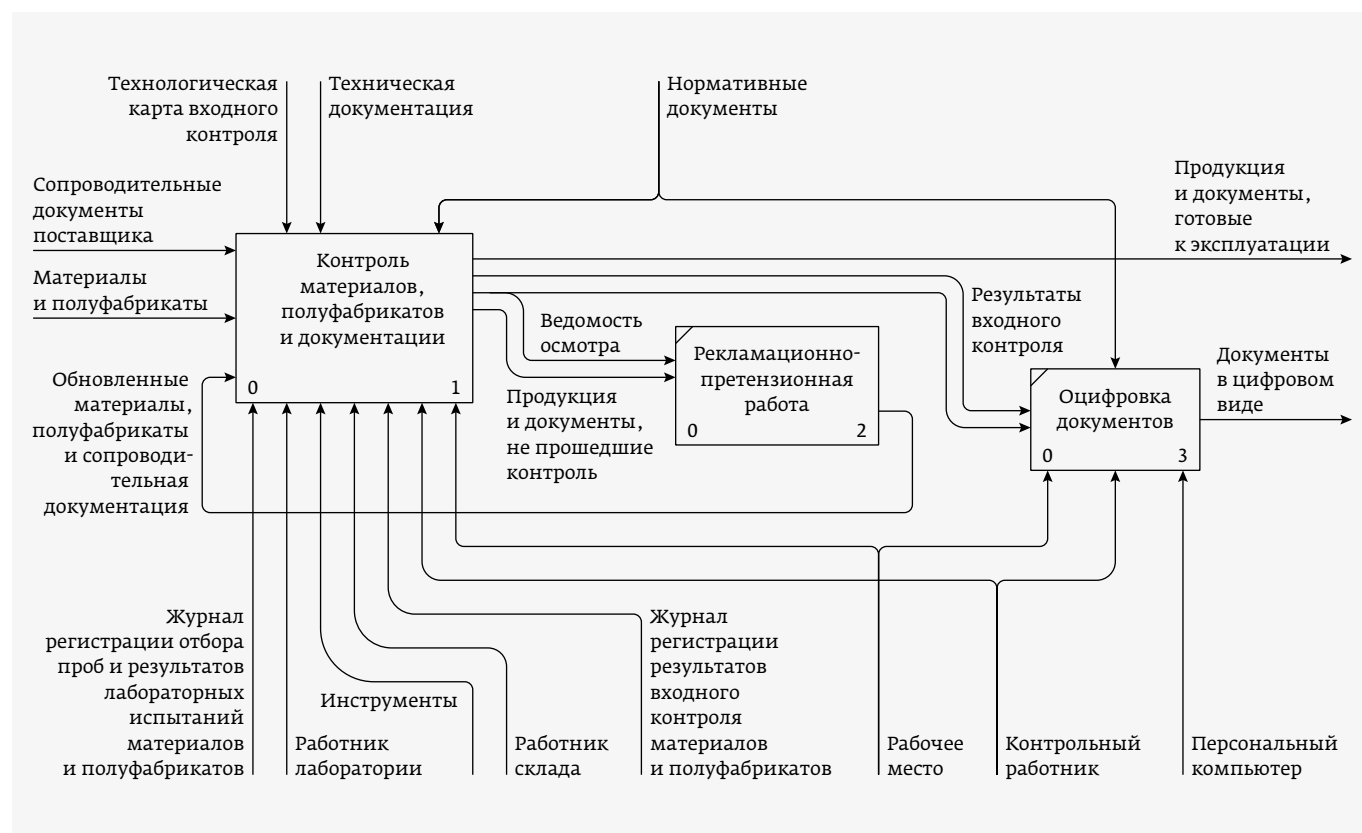


Рис. 2. Функциональная модель процедуры входного контроля



Рис. 3. Установка рентгеновского контроля Seamark ZM-X6600BM

Примером такой установки является система рентгеновского контроля Seamark ZM-X6600BM, оснащенная закрытым источником излучения (рис. 3).

Следует отметить, что для контроля качества оплавления припоя в условиях производства чаще всего нет необходимости использовать дорогостоящие лабораторные рентгеновские установки с субмикронным разрешением, которые отличаются высокими требованиями к техническому обслуживанию.

Давайте посмотрим, как выглядят на рентгеновском снимке те пустоты в паяном соединении, о которых идет речь (рис. 4). С помощью недорогого и простого в использовании рентгеновского аппарата можно увидеть светлые

пятна то там, то здесь, рассыпь «пузырьков шампанского», прозрачные области внутри выводов BGA-микросхем (рис. 5). Это и есть следы «пустотного диверсанта», которого нам предстоит найти и обезвредить.

Каким образом можно оценить деградацию механической прочности соединения, выявить ухудшение его электрических и тепловых характеристик? Представьте себе, что может наделать такая пустота в припое в ходе эксплуатации изделия, оказавшись под теплоотводом QFN-элемента, внутри паяного соединения вывода BGA или в соединении, являющемся частью СВЧ-тракта? Да и в любом месте электрической цепи такой «гость» – совсем не подарок.

Что же делать, когда выявлены признаки недостаточного качества пайки? Можно ввести тотальный контроль за качеством финишного покрытия контактных площадок, ужесточить правила хранения плат и компонентов. Можно закупить целый комплекс оборудования, позволяющего проверять паяемость компонентов, контролировать равномерность и форму нанесения паяльной пасты. При этом можно потерять много времени, нарушить процессы производства, а деньги могут оказаться выброшенными на ветер. Существует более эффективный способ защиты, который к тому же во многом снижает беспокойство, причиняемое неидеальной комплектацией и расходными материалами. Суть метода такова: позволим пустотам образовываться при печати паяльной пасты в установке, но запретим им оставаться в паяном соединении в печи оплавления. Принцип, который здесь применяется, основан на том, что каждая такая пустота исходно это пузырек воздуха, который и сам стремится вырваться за пределы соединения вывода элемента и контактной площадки.

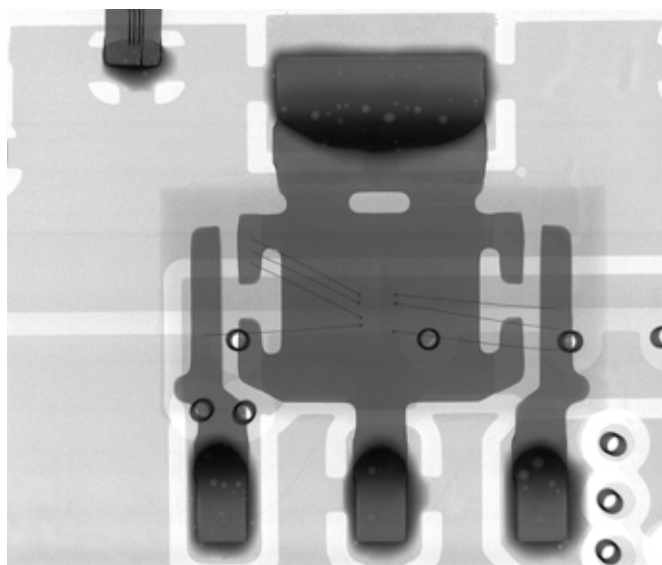


Рис. 4. Пустоты в паяных соединениях

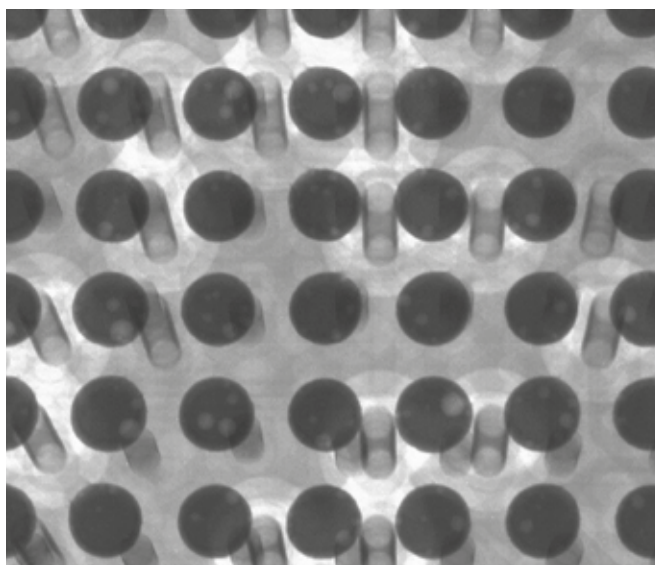


Рис. 5. Пустоты в контактах корпуса BGA



Рис. 6. Печь SMT с вакуумным модулем

Пузырьку надо лишь помочь в таком полезном стремлении, для чего существует... вакуум. Действительно, чем больше перепад давлений в самом пузырьке и в окружающем оплавляемую печатную плату пространстве, тем быстрее и надежнее будет процесс очистки расплавленного припоя от газовых примесей. В результате мы получим прочные, монолитные контакты, готовые противостоять всем нагрузкам. Но как обеспечить такой полезный вакуум в конвейерной печи? Есть простое и изящное решение: в некоторых печах предусмотрена возможность встраивания вакуумного модуля, который не только значительно улучшает качество пайки, но и может способствовать увеличению пропускной способности линии в целом (рис. 6).

Еще совсем недавно вакуумная технология была доступна лишь крупным международным корпорациям, производителям автомобильной электроники и специализированного оборудования. Но уже сегодня российские производители имеют возможность

реализовать эту эффективную технологию на своих предприятиях. Пример такого внедрения приведен в статье [6], где подробно описан процесс интеграции печи оплавления с вакуумным модулем на новом предприятии в Санкт-Петербурге.

Еще раз взглянем на результат оплавления с помощью рентгеновской системы. Итак, сочетание простой и быстрой рентгеновской проверки с пайкой при пониженном давлении даст нам искомую надежность контактов. Смотрите, пузырьки покинули соединения, а значит цель, которой мы добивались, достигнута (рис. 7).

Хотите надежно защитить свои изделия от преждевременного отказа?

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зеленков Д. В., Похомчикова Е. О.** Исследование вариантов реализации мобильного рабочего места работника входного контроля Иркутского авиационного завода // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». 2022. № 6.
2. ГОСТ Р 56427-2022. Пайка электронных модулей радиоэлектронных средств. Автоматизированный смешанный и поверхностный монтаж с применением бессвинцовой и традиционной технологии. Требования к технологии сборки и монтажа. 2022.
3. **Ribas M., Sarkar S., Bilgrien C.** Effect of voids on thermo-mechanical reliability of solder joints // Proceedings of SMTA International. Rosemont, IL, USA. Sep. 17–21, 2017. PP. 667–673.
4. **Previti M. A., Holtzer M., Hunsinger T.** Four ways to reduce voids in BGA/CSP package to substrate connections // Cookson Electronics. 2010.
5. ГОСТ IEC 61188-5-8-2013. Межгосударственный стандарт. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5–8. Общие требования. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). 2014.
6. Фантастическая технология для тех, кто не верит в сказки // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2021. № 9. С. 56–61.

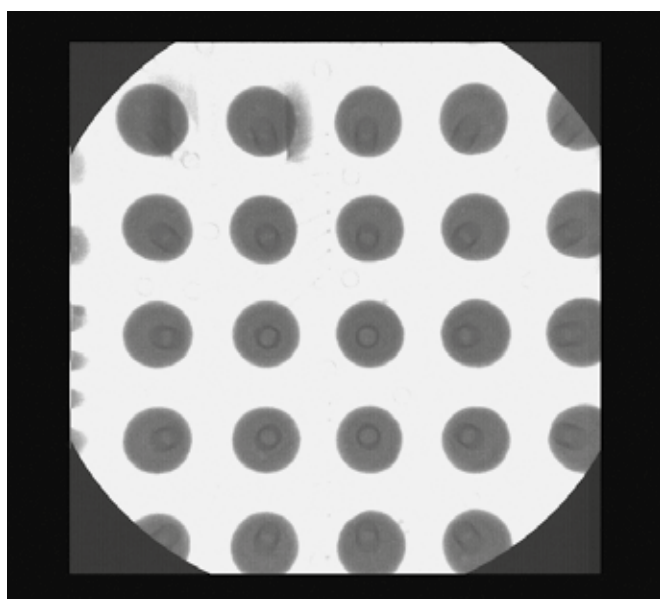


Рис. 7. Рентгеновский снимок контактов после обработки в вакуумном модуле

ИМС и ППП устойчивые к СВВФ

ИМС СОЗУ (информационная емкость 4Кбит + 16Мбит) Разрядность входных/выходных данных

1, 4, 8 бит	16 бит	32 бита
серия 537	1669PA025	1669PA015
серия 541PY	9000PY1Y	9000PY3Y
серия 1635PY	9000PY6Y	9000PY4Y
серия 1642		9000PY5Y
1666PE014		
9000PY2Y		

ИМС ПЗУ (информационная емкость 4Кбит + 4Мбит)

Однократно программируемые	Многократно программируемые
Серия 541PT	1644PC1TBM/ ATBM
Серия 1623PT	1644PC2T
Серия 1632PT	
Серия 1635PT	
1675PT014, 1676PT015	
1835PE2T	
9001PT1Y	

ИМС управления питанием Регуляторы напряжения

Линейные	Линейные LDO	Импульсные
Серия 1244	Серия 1325	1326PH1T/ T1
Серия 1253	Серия 1344	1326PH2T/ T1
Серия 1343	Серия 1264	1326PH3T/ T1
1252EP1T	5318EP015	5326NH014
1342EH5T	5323EP014	
1349EG1Y	5324EP015	

Источники опорного напряжения	Супервизоры питания	Драйвера управления полевыми транзисторами
142EP1UIM/ TIM	5318AP1TBM	
142EP2UIM	Серия 1345	5325KX014
1369EC014	(12 типономиналов)	5325KX024
1369EC01A4	Серия 5322	1114EU7UIM
1369EC01B4	(8 типономиналов)	1114EU8UIM
1369EC024		1114EU9UIM
		1114EU10UIM



Интерфейсные ИМС

стандарты	манчестерский код	стандарт LVDS
RS485/422, EIA/TIA232	5559IN67T	5560IN1T
5559IN1T	5559IN68T	5560IN2T
5559IN42T	5559IN73T	5560IN3Y
5559IN3TBM	5559IN74T	5560IN4Y
5559IN5TBM	5559IN83Y	5560IN5Y
5559IN17T/ 18T		5560IN6Y
5559IN20T/ 21T		5560PL1Y
5559IN84T/ 85T		

Микроконтроллеры и микропроцессоры

архитектура и система команд MCS-51	RISC - архитектура
1880BE31Y/ P	1881BG4Y
1880BE51Y/ P	1881BE2T
1880BE1Y	
1880BE81Y	

Цифровые потенциометры

одноканальные	двухканальные	четырёхканальные
1315PT11T	1315PT12T	1315PT14T
1315PT21T	1315PT22T	1315PT24T
1315PT31T	1315PT32T	1315PT34T
1315PT41T	1315PT42T	1315PT44T

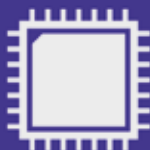
Дискретные полупроводниковые приборы, устойчивые к СВВФ

Транзисторы

биполярные	полевые
p-n-p транзисторы	мощные N-канальные
p-n-p транзисторы	мощные P-канальные
p-n-p транзисторы Дарлингтона	маломощные N- и P-канальные
p-n-p транзисторы СВЧ	

Диоды

с барьером Шоттки	импульсные
	импульсные диодные сборки



ИМС устойчивые к СВВФ

Разработка и освоение ИМС

Интерфейсные

ОКР «Магистраль 51»
5560ИН7У (аналог SN65LVDS050)
5560ИН8У (аналог SN65LVDT050)
5560ИН9У (аналог SN65LVDS051)
5560ИН10У (аналог SN65LVDT051)
5560ИН11У (аналог SN65LVDS179)
5560ИН12У (аналог SN65LVDT179)
5560ИН13У (аналог SN65LVDS180)
5560ИН14У (аналог SN65LVDT180)

ОКР «Магистраль 388»
5560ИН15У (аналог SN65LVDS388)
5560ИН16У (аналог SN65LVDS389)
5560ИН17Т (аналог SN65LVDS390)
5560ИН18Т (аналог SN65LVDS391)
ОКР «Каскад С»
5559ИН83У (аналог HI-1575)
ОКР «Дельта 164245»
5584ИН2У

Операционные усилители

ОКР «Дуга 820»
1467УД4У (аналог AD820)
1467УД5Т (аналог AD822)
1467УД6Т (аналог AD823)
1467УД7Т (аналог AD824)
ОКР «Дуга 249»
1467УД8Т (аналог OP249)

Таймер

ОКР «Таймер» *
(аналог LMC555)

LED-драйвера

ОКР «Драйвер 1366» *
(аналог ZXLD1366)
ОКР «Драйвер 3518» *
(аналог LT3518)

Цифро-аналоговый преобразователь

ОКР «Дельта 5324» (аналог AD5324ARM) –
12-разрядный четырехканальный

* - в разработке

Управление питанием

ОКР «Дот 158»
5317ЕС015 (аналог AD1582)
5317ЕС025 (аналог AD1583)
5317ЕС035 (аналог AD1584)
5317ЕС045 (аналог AD1585)
ОКР «Дедукция 340» *
(аналог MP2307)

Цифровая логика

ОКР «Дакота 125» *
(аналог SN74LVC1G125)
ОКР «Инвертор» *
(аналог NC7WZU04)

Датчики температуры

ОКР «Дюна 17215» *
(аналог DS1721)
ОКР «Дюна 60» *
(аналог LM60CIZ)
ОКР «Датчик 112» *
(аналог TMP112AIDRL)



Операционные усилители

одноканальные	двухканальные	четырёхканальные
1467УД3У	1467УД1Т	1467УД2Т/ Р
1467УД4У	1467УД5Т	1467УД7Т
1467УБ1У	1467УД6Т	
1473УД1Т/ АТ	1467УД8Т	

Компараторы напряжения

одноканальные	двухканальные	четырёхканальные
1467СА4ТБМ	1467СА1Т	1467СА2Р
		1467СА3ТБМ

Цифровые датчики температуры

однопроводной интерфейс	трехпроводной интерфейс
5019ЧТ2Т (аналог м/с DS18B20)	5019ЧТ1Т (аналог м/с DS1620)

Аналого-цифровой преобразователь

5115НВ015 (аналог м/с TLV2548М) – 12-разрядный восьми-
канальный АЦП с SPI интерфейсом с архитектурой
последовательного приближения

Цифровые логические ИМС

биполярная (ТТЛ, ТТЛШ) серия 133 (аналоги м/с серии Sn54х); серия 138 (аналоги м/с серии SN54Л); серия 1533 (аналоги м/с серии SN54АLS)	КМОП серии 1554 (аналоги м/с серии SN54АС); серия 1564 (аналоги м/с серии SN54НС); серия 1594 (аналоги м/с серии SN54АСТ); серии 5584 (аналоги м/с серии 74VHC)
--	---