

# Определение качества отмывки в производстве бессвинцовых печатных плат

Майк Биксенмэн (Mike Bixenman), главный технолог корпорации Kyzen (США)  
mikeb@kyzen.com

*Коррозия паяных соединений в виде электрохимической миграции приводит к отказам электронных узлов. Ионные загрязнения, особенно в присутствии влаги, повышенная электрическая нагруженность, рост нитевидных кристаллов, утечки тока — вот факторы ускорения коррозии. Повышение плотности монтажа и сокращение топологических норм усугубляет проблему. Поэтому по мере роста функциональности и миниатюризации электронных узлов, а также при внедрении не использующих свинца технологий все важнее обеспечить высокое качество отмывки. В статье рассмотрены критерии отмывки, необходимые для достижения высокой надежности не содержащих свинца паяных соединений.*

## ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие электроники требует все большей миниатюризации — уплотнения монтажа и использования узких проводников и промежутков между ними. При этом риск отказов электронных узлов повышается из-за явлений роста дендритов и интерметаллизации, что в конечном счете приводит к короткому замыканию цепей. В литературе по надежности электронных схем [11] отмечается, что узлы, собранные без применения свинца, более склонны к этому явлению.

Растет темп нововведений в области тестирования электроники, в нормативной базе и стандартизации [5]. Миниатюризация требует постоянного ввода новых паяльных материалов и ставит новые задачи в области пайки [7]. С уменьшением размера площадок, переходных отверстий и других топологических элементов повышается уязвимость паяных соединений, поэтому платы и компоненты требуют все более внимательного подхода.

Расширение функциональности и уменьшение размеров устройств требует больших изменений в проектировании схем [7]. По мере этого растет и сложность производства. Для того чтобы разместить больше цепей на меньшей площади, требуется уменьшать все размеры. Поскольку размеры корпусов элементов продолжают уменьшаться, для повышения надежности конструкторы должны проектировать компоненты с особым учетом их работы в системе «компонент—плата».

## СУТЬ ПРОБЛЕМЫ

Остаточные загрязнения на плате могут увеличить риск возникновения короткого замыкания между точками пайки или дорожками [2]. Считается, что в производстве электроники вредны как ионные, так и неионные остатки. Хотя и те, и другие могут снизить надежность устройства в эксплуатации, с ионными загрязнениями связано куда большее число отказов [2].

Проблема заключается в том, что методы испытаний, разработанные IPC (Институт по сборке и монтажу электронных схем), не учитывают всех проблем, которые могут возникнуть в производстве и оказать влияние на надежность электронных изделий. Стандарты IPC предусматривают только эмпирические оценки материалов и процессов, и не берут в расчет всех возможных сочетаний материалов и технологий, которые могут встретиться на производстве. Локальные загрязнения могут и не поднять общий уровень загрязнения всего узла, но влияние таких загрязнений нанесет ничуть не меньший ущерб надежности устройства.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Отказ от свинца в корне изменил основополагающий процесс сборки электроники — создание паяных соединений между компонентами [15]. Рост числа линий ввода/вывода, постоянная миниатюризация, повышающиеся требования к надежности, а также другие задачи невозможно решить, не уделяя внимания чистоте отмывки монтажной платы. Чистота бессвинцовых паяных узлов должна быть такой, чтобы исключить или

кардинально снизить риск возникновения токов утечки и электрохимической миграции [13].

Переход на бессвинцовую технологию требует гораздо более тщательного контроля производственных процессов [11]. Если раньше технолог мог настроить процесс выбором активности флюса, изменением скорости конвейера или увеличением времени прогрева, содержанием олова/тугоплавкостью припоя, то теперь ситуация изменилась. Даже незначительные отступления от четко определенных параметров техпроцесса могут резко увеличить выход бракованных плат [11].

Помимо более жестких требований к процессу пайки, возрастают и требования к степени очистки. Платы, обычно паяемые по технологии с несмываемым остатком, уже не отвечают этим требованиям. Если во время пайки образуются окислы флюса или огарок, будет наблюдаться высокий уровень ионных загрязнений. При воздействии высоких температур, характерных для бессвинцовой пайки, ламинат расширяется, что повышает риск поглощения им загрязняющих веществ. В дальнейшем это может вызвать электрохимические реакции и снижение надежности [11].

## Миниатюризация

Миниатюризация возлагает большие задачи на химию флюсов из-за увеличения объема окислов при повышенных температурах и ужесточения требований к итоговой чистоте [7]. Малый размер компонентов и промежутков между проводниками приводит к повышению concentra-

ции тепла во время пайки [6]. Таким образом, наиболее характерные проблемы — электрохимическая реакция, миграция металла и снижение поверхностного сопротивления — особенно актуальны для плат с высокой плотностью монтажа [6].

Пайки меньшего размера могут быть разрушены коррозией быстрее, чем более крупные [7]. Окисление порошковых припоев увеличивается с уменьшенным размером частиц из-за большей площади поверхности порошка. Переход от оловянно-свинцовых припоев к бессвинцовым усугубляет проблему, поскольку бессвинцовые припои более подвержены коррозии, чем оловянно-свинцовые [7].

Препятствия для материалов, которые могут вызвать коррозию, уменьшаются одновременно с уменьшением размера корпусов [9]. Осаждение загрязняющих веществ может происходить как в сухих, так и во влажных условиях. При 60%-й относительной влажности образуется слой воды толщиной в две-четыре молекулы. Более высокая влажность может ускорить химические реакции с участием загрязняющих веществ. При относительной влажности 80% толщина слоя воды достигает двадцати молекул, и ионы могут свободно перемещаться в этом слое. В этом случае влага и кислые остатки способны образовать коррозионные электрохимические ячейки [9].

Конденсация воды на поверхности корпусов ИС происходит при переходе температуры через точку росы, а силы поверхностного натяжения вызывают перенос загрязняющих веществ. При изменении условий вода испаряется, а загрязняющие вещества остаются [9]. Во влажной среде и под напряжением эти ионные загрязнения могут вызвать проблемы. Негативный эффект усиливается при большей плотности монтажа и повышении напряжения.

На постоянном напряжении электрическое поле растет обратно пропорционально промежутку между дорожками. Поэтому электрохимической миграции и формированию дендритов более подвержены платы с меньшим шагом дорожек [6]; их стойкость к формированию дендритов существенно уменьшается [7]. В результате происходит эрозия проводников и потеря изоляционных

свойств платы вплоть до короткого замыкания [11].

#### Флюсующие композиции для бессвинцовых припоев

Бессвинцовые сплавы обязательно должны быть совместимы с флюсующими композициями. Возможность применения флюса определяется, в числе прочего, «сроком жизни» и рабочим временем после нанесения, а также свойствами получаемого паяного соединения, в том числе способностью припоя образовывать шарики, повышению смачиваемости контактных площадок и прочностью получаемого соединения [1]. Большинство бессвинцовых сплавов имеют слабую смачивающую способность. Для достижения смачиваемости, сопоставимой с эвтектическими оловянно-свинцовыми припоями, необходимы более агрессивные флюсы [3].

Паяемость является мерой легкости, с которой контактные площадки и выводы смачиваются расплавленным припоем, и ей по-прежнему уделяется пристальное внимание во всех процессах пайки, особенно при переводе производства на бессвинцовые технологии [15]. Флюс должен удалять поверхностные окислы с контактных площадок и выводов компонентов, содействуя правильному формированию припоя, а также способствовать теплообмену для обеспечения правильной температуры пайки. Если поверхность припоя чиста, необходимо меньшее количество активатора для пайки компонента [16].

Ли (Lee) (2008) указывает желательные характеристики безотмывочных флюсов для припоев, не содержащих свинца:

- пониженная летучесть;
- отсутствие галогенов;
- большой флюсующий потенциал;
- чрезвычайно малое образование нагара;
- повышенная стойкость к окислению и образованию нагара;
- более эффективное противодействие окислению;
- пониженная температура активации;
- пониженная скорость смачивания в точке плавления припоя;
- пониженное разбрызгивание;
- обеспечение хорошего контакта контрольных шупов;

- стимулирование зародышеобразования припоя после охлаждения;
- повышенная стойкость к усадке [7].

Цель безотмывочного процесса — создание из остатков защитного барьера, препятствующего ионному загрязнению монтажа. Выбор надежного поставщика продукции для безотмывочной технологии — непростая задача. Если производитель не хочет заниматься отмывкой плат, ему придется использовать дополнительные меры контроля, чтобы не превысить установленный порог загрязнений.

Флюсующие составы, разработанные для бессвинцовой пайки, содержат несколько видов полимерных и модифицирующих добавок [16]. Добавки обеспечивают требуемую вязкость состава, сохранение растворимости, долгосрочные и краткосрочные диэлектрические параметры и заданные характеристики при нагревании. Ключ к сохранению всех желаемых характеристик продукта, а также к обеспечению максимальной эффективности флюса находится в глубоком понимании взаимодействия между этими полимерами и работы модифицирующих добавок [16].

Флюсующие составы для эвтектических оловянно-свинцовых припоев хорошо известны и отработаны. При более высоких температурах пайки, характерных для бессвинцовых сплавов, органические растворители должны быть термически более стабильны для снижения уровня активации, необходимого для пайки компонентов. Недостаточная термическая стабильность — одна из важнейших проблем, требующая более активных флюсующих составов. Это приводит к образованию таких остатков, которые исключают применение безотмывочной технологии [16].

По мере повышения температуры пайки флюсующие материалы претерпевают изменения физических и химических свойств в результате испарения летучих фракций, изменения поверхностного натяжения и вязкости [16]. Это приводит к «сметанию» флюса паяльной волной, и в конечном итоге — его тепловому разрушению. В результате флюс не выполняет своих защитных и смачивающих задач, что приводит к образованию галтелей припоя и его затеканию в переходные

отверстия. В сочетании с большим перепадом температур между нижней и верхней стороной печатной платы, характерным для волновой бессвинцовой пайки, это приводит к преждевременному затвердеванию припоя и его затеканию на верхнюю сторону платы [16].

В процессе волновой пайки активаторы должны позволять расплавленному припою нормально работать и надежно отделяться от неметаллизированных поверхностей после прохода волны [16]. Поэтому флюс должен одновременно обладать «моющими» свойствами и обеспечивать заданное поверхностное натяжение во время контакта с паяльной волной. Он должен быстро растекаться по поверхности, способствовать вытеснению загрязняющих веществ, а также образовывать сплошную мономолекулярную пленку, обеспечивающую заданное поверхностное натяжение в профиле волны. Это достигается при помощи флюсовой композиции, в состав которой входят поверхностно-активные вещества, характеристики которых оптимизированы для работы в кислой среде флюса [16].

Для того чтобы мономолекулярная пленка флюса была стабильной, она должна хорошо смачивать и покрывать поверхность при подъеме температуры во время прохода паяльной волны [16]. Для создания заданного поверхностного и граничного натяжения в твердо-жидком взаимодействии необходимо сочетание нескольких поверхностно-активных веществ. Состав флюса должен способствовать смачиванию неметаллических поверхностей и снижать поверхностное натяжение. Такая система нуждается в контролируемом размере капель флюса, наносимого распылением, для его правильного распределения и достаточной капиллярной активности в сквозных и переходных отверстиях. Подобные флюсы оставляют больше загрязнений, склонны к пенообразованию и требуют последующей отмывки [16].

#### Электрические отказы

Поверхностное сопротивление изоляции (Surface Insulation Resistance — SIR) печатных плат необходимо проверять после каждого изменения процессов, замены материалов или производственного оборудова-

ния. SIR определяется как электрическое сопротивление между двумя проводниками [2]. Величину SIR можно рассматривать как способность системы противостоять короткому замыканию или утечкам тока через загрязнения на поверхности платы. Результаты измерения SIR находятся в прямой зависимости от качества отмывки [2].

Измерение SIR позволяет оценить вероятность проявления отказов, вызываемых коротким замыканием или токами утечки между проводящими дорожками [2]. Такие отказы могут свидетельствовать о недопустимом взаимодействии веществ, применяемых при сборке платы, недостаточном контроле процессов или плохом качестве материалов. Измерение SIR осуществляется путем контроля изменения тока во времени и, как правило, проводится при повышенной температуре и влажности.

SIR складывается из поверхностного сопротивления, объемной проводимости и электролитических утечек, вызываемых загрязнениями [2]. Таким образом, SIR является совокупностью различных сопротивлений, включенных параллельно, — как вызванных загрязнениями, так и иных [14]. Высокие значения SIR свидетельствуют о хорошем качестве отмывки и отсутствии дендритов. Низкие значения говорят о наличии проводящих дендритов или солей между проводниками [2].

#### Электрохимическая миграция

Электрохимическая миграция проявляется в виде возникновения проводящих металлизированных «мостиков» между проводниками, когда они находятся под действием электрического поля, вызванного постоянным током [5]. Эти мостики растут от положительно заряженного проводника (анод) в направлении отрицательно заряженного (катод), что в конце концов приводит к короткому замыканию между ними. Проводящие мостики обычно имеют древовидную форму дендритов [2]. Такие дендриты формируются на любой поверхности при наличии ионных остатков, электрического поля и конденсации влаги [5].

В результате электрохимической миграции происходит гальваническое восстановление ионов металлов [8]. Ионные загрязнения в сочетании с во-

дой формируют локальные источники кислоты, которая растворяет ионы металлов. Под воздействием электрического потенциала ионы металла мигрируют между проводниками по изолирующему покрытию платы, образуя на своем пути металлические нити [8].

Для возникновения электрокоррозии и утечек тока должны присутствовать три фактора [8]:

- электрический потенциал между двумя точками;
- наличие воды или водяного пара;
- ионные загрязнения.

Чем больше напряжение в цепях и значительнее степень загрязнения — тем выше риск возникновения коррозии [8].

Присутствие дополнительной влаги может привести к диссоциации ионных остатков и созданию проводящих растворов, известных как электролиты [2]. Хлориды и бромиды, обычно содержащиеся во флюсах и подложках ПП, являются наиболее распространенными веществами, способствующими формированию дендритов. Соли металлов из медесодержащих сплавов также обладают электропроводностью и могут создавать замыкания или образовывать металлизированные пленки [2].

Электронные узлы с использованием в конструкции серебра (иммерсионное серебрение/SAC-сплавы) при работе на повышенном напряжении в присутствии влаги склонны к образованию и росту дендритов [5]. Подобное поведение серебра было обнаружено еще в 1950–60 гг. Серебро является самым электроактивным среди прочих металлов, и легче всего вступает во взаимодействия [8]. В присутствии ионов серебра дендриты начинают расти при меньшем количестве ионных загрязнений, более низкой влажности и напряженности электрического поля. Подвижные ионы металла мигрируют в направлении катода, получают там недостающие электроны, восстанавливаясь до чистого металла, и образуют дендриты [14]. Таким образом, повышенная склонность бессвинцовых паяных соединений к гальванической коррозии объясняется наличием серебра [8].

При достаточной мощности окружающих цепей дендриты, обладающие малым сечением, могут вызвать



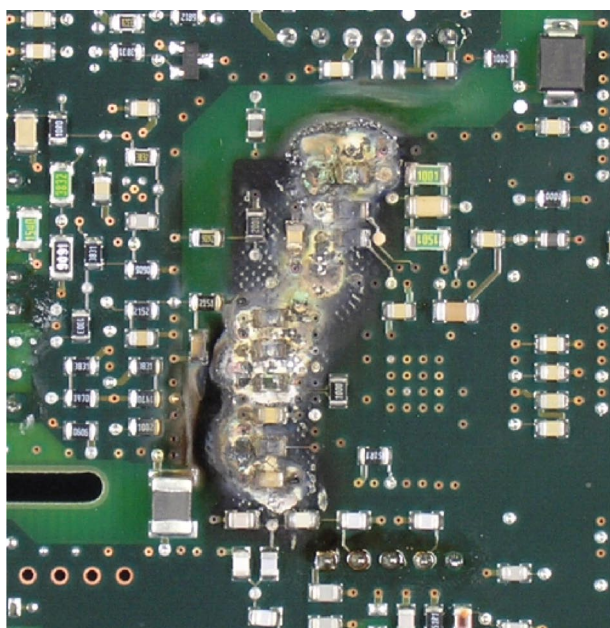


Рис. 1. Искрение и обугливание платы, вызванное электрохимической миграцией

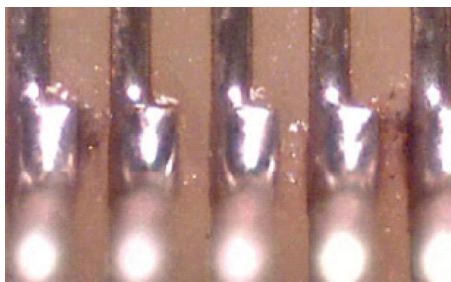


Рис. 2. Дендриты, вызванные наличием остатков флюса

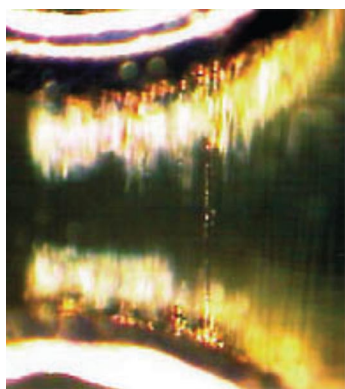


Рис. 3. Формирование проводящих анодных нитей (CAF)

искрение и приводит поначалу к необъяснимым периодическим отказам оборудования, сгорая подобно предохранителям [8]. Если загрязнение в какой-либо области выражено сильнее, искрение может происходить неоднократно, приводя к обугливанию

поверхности платы (см. рис. 1). Поскольку углерод электропроводен, в конечном итоге в этой зоне возникают утечки тока. Кроме того, утечки возможны и из-за наличия электролита [8].

Ионные остатки, окружающие металлические проводники, инициируют электрохимическую миграцию, когда присутствует влага, а в цепь подается напряжение. Электрохимическая миграция, в свою очередь, может привести к ускоренной коррозии и утечкам тока, росту дендритов, перекрестному взаимодействию цепей и другим отклонениям (см. рис. 2). Непредсказуемые химические реакции, происходящие в местах наличия загрязнений и влаги, могут вызвать разрушение как металлических, так и пластиковых элементов — проводников, изоляции и выводов [9].

#### Проводящие анодные нити

Формирование проводящих анодных нитей (Conductive Anodic Filament — CAF) состоит в накоплении проводящих солей металлов, и происходит за счет капиллярных сил вдоль микротрещин в материале платы [5]. Нити образуются из проводящих солей меди, и растут от анода к катоду вдоль волокон армирующего смолу стекловолокна [7]. Часто CAF начинают расти по микротрещинам между смолой и волокном, которые зарождаются при механической обработке заготовок (сверлении) и уве-

личиваются под действием высокой температуры при пайке (см. рис. 3). Симптомы CAF могут проявляться даже тогда, когда сверление не применяется. При сокращении топологических норм риск отказов из-за коротких замыканий, вызванных CAF, увеличивается [7].

В конструкциях с высокой плотностью монтажа, которая растет из года в год, шаг отверстий становится все меньше и меньше. Для плат из материала типа FR-4 это становится серьезной проблемой [10]. CAF является результатом миграция меди, ионы которой при высокой плотности монтажа способны мигрировать через волокна стеклоткани. Сначала медь растворяется на аноде, переходя в форму ионов. Затем эти ионы мигрируют по волокнам стеклоткани, и, достигая катода, восстанавливаются до металла, формируя дендриты [10].

Риск появления CAF зависит от базовых свойств материала и вида обработки ПП [10]. Волокнистая структура ламината, сверление отверстий малого диаметра, а также наличие остатков меди ускоряют CAF в присутствии влажности, повышенной температуры и ионных загрязнений. Степень потери сопротивления изоляции зависит также от типа и технологии выполнения металлизации отверстий [12].

Первым этапом формирования CAF является деградация эпоксидной смолы/стекловолокна в области замыкания проводящей дорожки [12]. На втором этапе начинается электрохимический процесс с участием миграции металла. После того как образуются проводящие нити, происходит замыкание, которое при достаточном токе способно нарушить непрерывность нити, в результате чего сопротивление изоляции на некоторое время восстанавливается. Иона металла могут начать миграцию повторно, и процесс повторяется [12].

Уменьшение промежутков между проводниками увеличивает количество сбоев из-за формирования проводящих нитей [12]. При увеличенных промежутках для возникновения сбоя нить должна сформироваться на более длинном пути. Требуется также повышенная влажность, чтобы ее накопилось достаточно для образования непрерывной нити. Уменьшенный промежуток приводит к созданию

большого градиента потенциала, создающего повышенную движущую силу для миграции ионов. Таким образом, при более плотном монтаже интервал между отказами сокращается [12].

Повышение напряжения также повышает вероятность отказа из-за ускорения формирования проводящих нитей [12]. Были протестированы два образца материала FR-4, на один из которых подавалось напряжение 300 В, а на другой — 800 В. При расстоянии между проводниками 20 mil первый образец выдержал 450 ч, тогда как второй — только 100 ч.. Это объясняется тем, что под воздействием большего напряжения ионы быстрее движутся в среде электролита, что ускоряет миграцию металла между электродами. Когда электролит расположен в трещинах или узких каналах, эта скорость пропорциональна приложенному напряжению [12].

Наблюдается также зависимость скорости формирования проводящих нитей от температуры и относительной влажности [12]. Степень поглощения влаги материалом платы зависит от относительной влажности и температуры. При повышенной температуре в процессе оплавления припоя повышенная влажность может вызвать разделение волокон и смолы, тем самым повышая вероятность формирования проводящих нитей. Разница коэффициентов теплового расширения смолы и стекловолокна может привести к нарушению связи между ними [12].

Наработка на отказ, вызванная образованием проводящих нитей, как правило, уменьшается для бессвинцового монтажа [12]. Поглощение влаги, как известно, происходит быстрее при более высоких температурах. Поэтому даже минимальный уровень влажности в сочетании с повышенной температурой создает условия для отказа. Для повышения надежности готовых изделий и применяют защитные покрытия, наносимые после пайки и отмывки [12].

## СЛУЧАИ ИЗ ПРАКТИКИ

### Пример 1

**Вводная:** компания-производитель систем контроля водоснабжения перешла от эвтектических оловянно-свинцовых припоев на бессвинцовую

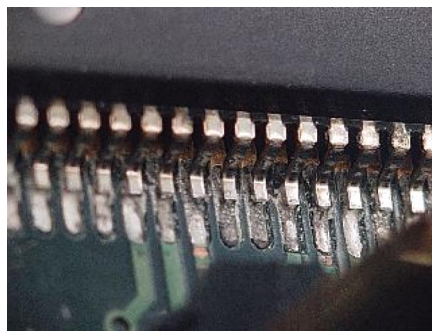


Рис. 4. К анализу причины отказов

технологии производства контроллеров. Смешанный монтаж на плате осуществлялся как с органическими кислотами, входящими в состав паяльной пасты, так по технологии припойной волны. После завершения монтажа платы подвергались групповой отмывке дистиллированной водой.

**Проблема:** Собранные таким способом платы начали выходить из строя — отказывала электроника. Контроллер работает во влажной среде. В присутствии влаги большое количество ионных загрязнений на плате приводит к электрическим отказам.

**Выявление причин:** для выяснения причины отказов платы были отправлены в лабораторию. Визуальный осмотр показал большое количество остатков флюса и наросты дендритов в местах с малым зазором между местами паяк. Электрохимическая миграция привела к массовому формированию дендритных мостиков, вызвавших искрение и обгорание платы возле контактных площадок компонентов (см. рис. 4).

**Анализ причин:** остатки флюса не были полностью удалены из малых зазоров между выводами компонентов. Платы отмывались горячей дистиллированной водой. Монтаж не содержащим свинца припоем ведется при более высоких температурах. Вследствие повышенных температур физические и химические свойства изначально водорастворимых материалов флюса могут измениться, что затруднит отмывку. В этом случае одной только воды может быть недостаточно для качественной отмывки остатков флюса вокруг контактных площадок.

**Рекомендации:** платы должны проходить контроль чистоты отмывки. Для улучшения растворимости остатков флюса необходимо применить 10–12% раствор специальных моющих

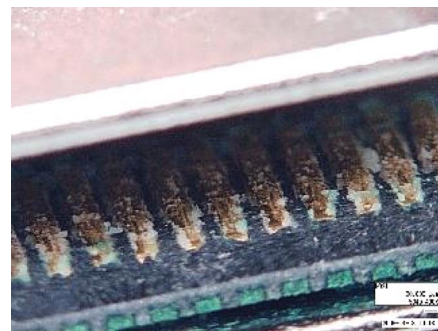


Рис. 5. Коррозия контактных площадок

щих добавок. Такой состав способен эффективнее удалять остатки флюса даже в малых зазорах между выводами и контактными площадками. На производстве были установлены модули контроля, которые позволят оценить успешность предпринятых мер.

### Пример 2

**Вводная:** жгут проводов вручную припаивался бессвинцовой паяльной проволокой, содержащей безотмывочный флюс. Устройство работает под высоким напряжением.

**Проблема:** высокое поверхностное натяжение флюса для бессвинцового припоя привело к затеканию флюса в переходные отверстия золоченых контактных площадок. Рост дендритов в месте расположения контактных площадок привел к массовым отказам (см. рис. 5).

**Анализ причин неисправности:** остатки безотмывочного флюса для бессвинцового припоя в присутствии влажности и электрического поля вызвали рост дендритов между контактными площадками. Ионные остатки флюса проводили ток при работе устройства.

**Рекомендации:** для исключения отказов в случае применения безотмывочных флюсов необходимо проводить анализ его остатков. Иногда, как в этом случае, может потребоваться отмывка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переход к бессвинцовой пайке настоятельно требует ужесточения контроля всех процессов. Большое число линий ввода/вывода, непрерывная миниатюризация, рост требований к надежности и другие условия приводят к повышению важности качественной отмывки печатных плат. Основная причина снижения надежности при бессвинцовой пайке — риск появле-

ния блуждающих токов (токов утечки) и электрохимической миграции.

Бессвинцовые SAC-сплавы имеют пониженную смачивающую способность. Поэтому для достижения смачивания, сопоставимого с традиционными припоями, требуются более агрессивные флюсы. Кроме того, при более высокой температуре пайки проявляется недостаточная термическая стабильность флюсов, что также требует более активных составов. Такие флюсы уже не могут классифицироваться как безотмывочные.

Наличие остатков флюса может приводить к снижению сопротивления между дорожками платы, и даже возникновению коротких замыканий, а также к постепенной коррозии и разрушению как металла, так и пластиков. При контроле чистоты отмывки необходимо анализировать не только общий уровень загрязнений, но и количество локальных остатков.

По вопросам приобретения продукции обращаться:

**ООО «Универсалприбор»**  
**Россия, Санкт-Петербург, 199004,**  
**В.О., 8-я линия, 59, лит. Б, корп. 2,**  
**тел.: (812) 334 55 66, факс: (812) 329 94 25**

**Россия, Москва, 117519,**  
**ул. Кировоградская, д. 24,**  
**тел/факс: (495) 775 84 37**  
**e-mail: pribor@pribor.ru, www.pribor.ru**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Toleno B. & Maslyk D (2008). *Process and assembly methods for increased yield of package on package devices. IPC Printed Circuits EXPO. APEX 2008. Las Vegas, NV.*
2. Partee B. (2004, Feb). *SIR Testing. EMPF. Retrieved on 3/24/2008 from <http://www.empf.org/empfasis/feb04/sirtesting.htm>.*
3. Lee N.C. & Bixenman M. (2001). *Lead-Free: How flux technology will differ for lead-free alloys. Nepcon West. Anaheim, CA.*
4. Oosterhof A., Ellis B., Naisbitt G. & Pauls D. (2000). *Component Cleanliness. IPC Technet Archives. Retrieved on 3/24/08 from [www.listserv.ipc.org/scripts/wa.exe?A2=ind0002&L=TECHNET&P=R72868](http://www.listserv.ipc.org/scripts/wa.exe?A2=ind0002&L=TECHNET&P=R72868).*
5. Cullen D.P. & O'Brien G. (2008). *Implementation of immersion silver PCB surface finishes in compliance with underwriters laboratories. IPC Printed Circuits EXPO. 2004. San Diego. CA.*
6. Takemoto T., Latanision R.M., Eagar T.W. & Matsunawa, A. (1997). *Electrochemical migration tests of solder alloys in pure water. Corrosion Science. 39(8), 1415—1430.*

7. Lee N.C. (2008). *Future lead-free solder alloys and fluxes — Meeting challenges of miniaturization. IPC Printed Circuits EXPO. Las Vegas, NV.*

8. Pauls D. & Munson T. (2000, Jan). *Questions and Answers I. Circuits Assembly. 11(1), 72.*

9. Hawes A. (2000). *Causes and effects of corrosion in plastic IC packages. Electronic Engineering.*

10. Murai H., Fukuda T., Fischer T. (2008). *The evaluation of CAF property for narrow TH pitch PCB. IPC Printed Circuits EXPO. Las Vegas, NV.*

11. Naisbitt G. (2008, March). *Cleanliness testing on the shop floor*

12. Rudra B., Pecht M.J. & Jennings D. (1996). *Electrochemical migration in multichip modules. Circuit World. 22(1), 67.*

13. Munson T. (1998, Nov). *Eliminating metal migration failures. Printed Circuit Fabrication. 21(11), 32.*

14. Schweigart H. & Wack H. (2007, April). *Humidity and pollution effects on Pb-Free assemblies. Circuits Assembly. 18(4), 34.*

15. Seatman K. & Nishimura T. (2008). *Properties that are important in lead-free solders. IPC Printed Circuits EXPO. Las Vegas, NV.*

16. Tiggelen-Aarden I.V. & Westerlaken E. (2008). *Performing flux-technology for Pb-free SN100C solders. IPC Printed Circuits EXPO. Las Vegas, NV.*