

Пайка печатных плат: идеал достигим!

Идеальная пайка печатной платы — это очень простое, но одновременно и очень редко встречающееся явление. Чем можно объяснить данное противоречие?

Если идеальная пайка — это легко, то откуда столько доработок и переделок?

Ответ, конечно же, заключается в том, что это просто, но только если знать как, а также учесть, что большая часть рекомендаций «экспертов по пайке» — ошибочна. Выполнение правил монтажа, соответствующих «отраслевым стандартам», гарантирует отказы и высокие затраты.

Джим Смит (Jim Smith)

**Перевод:
Сергей Шихов**

sergey@aconi.ru

Удивительно, но мало кто знает, как выполнить надежную пайку, хотя она является основным процессом в сборке печатной платы. Вместо умения паять часто приобретается прекрасный навык сокрытия дефектов, но это совершенно другая и не самая полезная способность. А визуально приемлемые соединения не всегда надежны.

Огромное количество времени и денег, которые индустрия сборки электроники выделяет на обучение и сертификацию специалистов, по большей части пустая трата ресурсов. Никто никогда не научился идеальной пайке, посетив тренинг по «отраслевым стандартам».

В этой статье я объясню, почему надежность пайки печатных плат настолько удручающая и какие меры необходимо предпринять для исправления ситуации.

Почему зачастую не получается идеальная пайка печатной платы

Проблема вот в чем: при обучении, как правило, основное внимание уделяется достижению нужного внешнего вида пайки, а не получению качественного соединения. Но «приемлемый» внешний вид вовсе

не гарантирует хорошее качество и отсутствие ошибок. Именно то, как было выполнено соединение, определяет, надежно ли оно и не нанесен ли неисправимый ущерб припаянному электронному компоненту (ЭК).

При чрезмерной температуре и длительном времени нагрева паяльника припой будет прилипать и к окисям, и к загрязнениям. Визуально результат такой пайки выглядит вполне нормально, хотя на деле в соединении, скорее всего, отсутствует интерметаллическая связь, а перегрев разрушил или изменил связи внутри компонента. Это ведет к нарушениям электрических характеристик и сокращению срока службы компонента. Всего несколько секунд неправильного применения паяльника уменьшает срок службы компонентов на годы! При этом соединение внешне соответствует требованиям, а внутреннее повреждение компонента зрительно не обнаруживается, а значит, нарушение технологии пайки никак не фиксируется, и сложившаяся плачевная ситуация продолжает повторяться из раза в раз.

Краткий исторический экскурс

Электроника не всегда состояла из полупроводниковых компонентов. Десятилетия назад, задолго до появления транзисторов и микропроцессоров, новейшим передовым достижением были вакуумные электронные лампы. Электрические соединения выполнялись припайванием проводов к клеммам гнезд, в которые вставлялись лампы. Некоторые разъемы и провода были довольно массивными и могли поглощать большое количество тепла.

Не очень эффективные паяльники превращали электричество в тепло кое-как. Поэтому главной сложностью во время пайки было предотвращение застывания припоя до того, как он затечет туда, куда требуется. Методы, разработанные специально для решения этой задачи, позволяли максимизировать количество применяемого тепла. Защита ламп от нагрева не требовалась, они вставлялись в гнезда только после окончания пайки и никогда не подвергались нагреву от паяльника.

Появление полупроводниковых компонентов изменило этот подход. Припой теперь наносился непосредственно на компонент, а не на провод или клем-



Пайка печатной платы

му разъема. Компоненты стали подвергаться нагреву при пайке, и это оказало существенное влияние на их надежность: перегрев ухудшал электрические характеристики.

Для того чтобы предотвратить повреждение при нагреве во время пайки, к выводам рядом с корпусом компонента можно было прикреплять металлические зажимы. Тепло паяльника поглощалось и рассеивалось зажимами прежде, чем достигнуть корпуса компонента. Зажимы назывались радиаторами (heat sink) и обеспечивали уверенную защиту от перегрева.

С момента появления твердотельной электроники каждая рабочая инструкция включала в себя требование использовать радиаторы (например, «Требования к пайке электронных сборок IPC J-STD-001G», раздел 4.6).

Но радиаторы сейчас никто не использует! Как это реализовать на практике? Выводы, если они вообще есть, слишком малы. Места для крепления радиатора нет. Но все учебные программы продолжают учить студентов цеплять зажимы, как в 1960 году.

Оплавление — не пайка

Дальше больше. В те годы, когда разрабатывались процедуры пайки, почти все выводы компонентов имели оловянное или оловянно-свинцовое покрытие. Эти поверхности оплавливались во время «пайки», и расплавленный припой просто стекал и смешивался с расплавленным металлом на поверхности, к которой пайка осуществлялась. Оксиды, будучи легче чистого металла, всплывали на поверхность жидких металлов, где контактировали с флюсом (который тоже легче металла) и удалялись.

Создание соединений путем смешивания расплавленных металлов довольно простой процесс, но это не пайка. Часто и более правильно использовался термин «оплавление» (reflowing).

Пайка же (или спаивание) — это процесс создания интерметаллической связи с металлическими поверхностями, которые не плавятся. Они не «оплавляются», не меняют свое агрегатное состояние. И это требует дополнительных этапов обработки, ненужных при смешивании расплавленных металлов. К сожалению, термин «оплавление» продолжает широко использоваться, хотя он уже не описывает происходящий процесс.

Разница между спаиванием и оплавлением (смешиванием расплавленных металлов) стала еще более актуальной, когда Европа запретила использовать в электронике свинец. Переход к миру без свинца привел к появлению новых сплавов для припоев, которые не привнесли в процесс никаких серьезных проблем, за исключением нескольких странностей.

При правильном контроле бессвинцовый припой работает достаточно хорошо, но он существенно менее терпим к дефектам, чем традиционный сплав олова и свинца. А поскольку процесс пайки печатных плат в большинстве компаний и так был дефектным, то переход на новые сплавы сопровождался трудностями, которые ошибочно приписывались припою, а не процессу.

Более серьезная проблема коснулась металлизации. Свинцово-оловянное покрытие

больше не применялось. Но оставшееся доступным оловянное покрытие оказалось плохим вариантом из-за высокого риска появления такого дефекта, как оловянные усы. В итоге выводы все большего количества компонентов (особенно многовыводных деталей для поверхностного монтажа) не оплавливались при температурах пайки. То есть их нужно было не оплавливать, а паять. Но принятые в отрасли методики часто включают процедуры, которые работают только при оплавлении. В итоге наиболее распространенные программы обучения и сертификация по ним просто гарантируют дефекты и сбои.

Пайка — это простая наука. Если ей заниматься, конечно...

На практике пайка — это наука, преимущественно химия и металлургия. Люди, которые составляли стандарты и рекомендации методов пайки, не смотрели на нее таким образом. Они действовали эмпирически, не понимая очевидного: в фундаменте правил должны лежать научные знания.

Они получали результат, который, казалось, выглядел правильным, и закрепляли эпизодические наблюдения в виде обязательных правил. Но если мы хотим, чтобы продукт работал, а производство было рентабельным, текущую ситуацию нужно менять.

Интересно, что надежность электронного изделия обратно пропорциональна сложности технологического процесса (объему переработки). Самая надежная продукция производится наиболее технологично (с наименьшим требуемым количеством операций и, соответственно, затрат). Худшее, что есть в нашей отрасли, — это чрезмерные затраты и слишком много отказов компонентов.

Использование флюса

Выше я сказал, что идеальная пайка — это просто. Но простота не означает, что достаточно наляпать расплавленный металл на детали и ожидать, что все получится хорошо. Для успешной пайки необходимы знания и дисциплина. И начинать следует с такого параметра, как паяемость.

Как уже говорилось, до недавнего времени большинство выводов компонентов покрывались оловом или оловом/свинцом. Пайка — это процесс создания интерметаллических связей с металлическими поверхностями, которые не плавятся во время нанесения единичного материала (припоя). Однако олово и олово/свинец плавятся при температурах пайки печатных плат, а припой просто смешивается с расплавленным покрытием. Это не «пайка», а «оплавление», более простой по сравнению с настоящей пайкой процесс.

Почему оплавление — это просто

При оплавлении нет необходимости удалять оксиды перед нанесением припоя: оксиды, будучи легче чистого металла, плавают на смеси жидкого металла покрытия и жидкого припоя.

Флюс также более легкий, чем жидкий металл. Он плавает на расплавленном металле, может легко контактировать с оксидами и разрушать их. При оплавлении флюс для пайки просто делает окончательное соединение блестящим и эстетически приятным.

Большинство устойчивых представлений о пайке зародилось в эпоху оплавления. Одно из таких убеждений, имеющее сегодня катастрофические последствия, гласит, что при ручной пайке не нужно использовать жидкий флюс. Считается, что флюса, содержащегося в проволочном припое, достаточно для выполнения работы. Хотя это может быть справедливо для **оплавления**, надежда исключительно на флюс в припое приводит к неполному смачиванию во время **пайки**.

Каковы основные дефекты пайки печатных плат?

Запрет на использование свинца в электронике коренным образом изменил нашу отрасль. Смесь олова и свинца больше не используется, а чистое олово применяется все реже из-за риска возникновения такого дефекта, как оловянные усы, что справедливо для многовыводных компонентов поверхностного монтажа, например, для микросхем.

Поверхности выводов новых компонентов не оловянные и не оловянно-свинцовые. Это металлы с более высокими температурами плавления, которые не оплавливаются при нанесении припоя. Другими словами, это металлы, которые паяются, а не оплавливаются. И перед нанесением припоя поверхности должны быть тщательно очищены. Этого не произойдет, если флюс содержится в проволочном припое, так как флюс в припое не может быть высвобожден, пока припой не расплавится. Расплавленный припой образует барьер между флюсом и поверхностью металла, препятствуя полному удалению оксидов и вызывая неполное смачивание.

Решение: жидкий флюс

Единственный способ гарантировать, что флюс достигнет поверхностных оксидов до того, как припой расплавится, — сначала нанести жидкий флюс. И требуется нечто большее, чем просто незначительное количество флюса. Флюсовая кислота (часть, которая удаляет оксиды) нейтрализуется во время химической реакции раскисления. Следовые количества флюса будут нейтрализованы до того, как поверхность будет полностью дезоксидирована. В пайке флюс — это больше, чем наш помощник — он крайне необходим. Тем не менее отраслевые «эксперты» очень часто дают рекомендации не использовать жидкий флюс.

Контроль нагрева

Основные правила пайки — методы, которые в большинстве случаев используются и сегодня, — появились около 70 лет назад. Как уже было отмечено, в то время самые передовые электронные компоненты состояли

из вакуумных ламп, а вся пайка выполнялась вручную и заключалась в соединении проводов с наконечниками на гнездах, в которые затем вставлялись лампы.

Провода и наконечники вакуумных ламп сложно повредить в результате перегрева, а чувствительные компоненты — радиолампы — нагреву не подвергались. Но не все было так просто: некоторые провода и наконечники имели довольно большой размер, а паяльники не очень эффективно превращали электричество в тепло. В такой ситуации ключевой задачей при пайке было поддержание температуры на достаточном уровне, чтобы припой хорошо плавился и растекался. Необходимо было предотвращать преждевременное застывание припоя, поэтому при обучении особое внимание уделяли тому, что перед нанесением припоя детали должны быть очень, очень горячими. Именно тогда возник термин «холодная пайка» (cold solder), и был он более чем уместен.

В современной электронике холодная пайка практически не встречается, но ее часто ошибочно вспоминают при «постановке диагноза» в случае проблем со смачиванием.

Радиаторы

С появлением твердотельных компонентов (в начале — резисторов и конденсаторов) активные элементы схемы также стали подвергаться воздействию тепла паяльника. И это вызвало эпидемию дефектов и отказов компонентов, прежде чем удалось выявить причину данного явления, которая заключалась в термочувствительности новых деталей.

Решением, как я уже сказал, стало использование металлических зажимов, радиаторов, которые защищали компоненты. Зажимы крепились к выводам около корпуса компонента. Тепло текло от паяльника к телу компонента, но на пути поглощалось радиатором. Отказы компонентов резко сократились.

Надежность также повысилась за счет автоматической пайки, которая в то время осуществлялась исключительно пайкой волной припоя. При использовании этой технологии компоненты подвергаются значительно более низким пиковым температурам. То же относится и к появившемуся позже поверхностному монтажу (пайке оплавлением). Таким образом, сегодня тепловые повреждения компонентов и соединений — это в первую очередь проблема ручной пайки.

Пайка мелких компонентов

Радиаторы обеспечивают отличную защиту компонента от повреждения вследствие перегрева, но могут использоваться только с ЭК, имеющими выводы достаточно большого размера для размещения зажимов.

Выводы большинства компонентов для поверхностного монтажа не соответствуют этому условию, не говоря о том, что многие SMT-компоненты вообще не имеют отдельных выводов. Использование зажимов просто не практично на современном производстве. В общем-то, оно не является таковым уже лет 25.

И тем не менее в стандарте IPC J-STD-001G, которым руководствуются компании, выполняющие сборку электронных блоков, даны следующие рекомендации:

«4.6 Термическая защита.

При ручной пайке, лужении или доработке термочувствительного компонента необходимо принять защитные меры (D1D2D3) для минимизации нагрева компонента или предотвращения теплового удара, например, радиатор, термощунт, предварительный нагрев. Защита может быть обеспечена посредством контролируемого процесса нагрева».

Приведенная выше выдержка из стандарта — пример инерции в нашей отрасли: после внедрения технологии в практику изменения в документации происходят со скоростью улитки, если происходят вообще.

При этом несоответствие требованиям стандартов является дефектом для всех классов продукции. Поскольку у производителя нет ни малейшего представления о том, как удовлетворить этим требованиям, то выходит, что почти каждый завод выпускает дефектную продукцию, но, кажется, никого это не волнует.

Как я уже отмечал, тепловые повреждения компонентов визуально никак не обнаруживают себя, и поэтому в их отношении часто действует негласное правило «с глаз долой — из сердца вон». Но если мы возьмем электростатические повреждения, то увидим, что они также происходят внутри компонентов и заметны не более чем перегрев. Тем не менее ни одно солидное предприятие по производству электроники не станет рассматривать возможность работы без строгих мер по предотвращению электростатического разряда. Почему такая разница? Вероятно, причины этой ситуации лежат в финансовой сфере.

Для обеспечения антистатической защиты на производствах используются специализи-

рованные инструменты и одноразовые материалы, что требует огромных суммарных затрат на мировом уровне.

Большие затраты — это большие бюджеты, которые становятся доходами компаний, занимающихся изготовлением и поставкой продукции, необходимой для выполнения требований антистатической защиты. И благодаря рекламной работе этих компаний мы твердо знаем: статика представляет собой серьезную угрозу надежности. То же самое относится и к влажности.

А вот для предотвращения теплового повреждения не нужно дополнительно закупать специальные материалы. Нет больших бюджетов, нет массовой рекламы, а следовательно, и признание проблемы ограничено.

Да, возможно, я немного преувеличил игнорирование проблемы перегрева компонентов. Следует признать: некоторые производители настолько обеспокоены этим, что тратят довольно большие деньги на паяльники, которые поддерживают постоянную температуру. Некоторые компании даже заходят настолько далеко, что контролируют реальную температуру паяльников и, если возможно, проводят повторную калибровку, как только отклонение от выставленного значения начинает вызывать сомнения. Но нужно сказать, что все они тратят деньги впустую.

Паяльники с постоянной температурой причинят такой же вред, как и менее точные инструменты. Перегрев не определяется только температурой паяльника: загвоздка в том, что паяльник и припой используются вместе.

Институциональное безразличие

В 1980-х годах я провел несколько семинаров по пайке для инженеров на площадке Naval Weapons Center Soldering Standards (Центр стандартизации пайки военно-морского вооружения) в Чайна-Лейк, штат Калифорния.

Я спросил директора (легендарная фигура в области отраслевых стандартов, которая имела высшую власть над всеми требованиями Министерства обороны к пайке):

«Как вы предотвращаете перегрев?»

«Паяем быстро», — сказал он.

«А насколько быстро?» — спросил я. Он тут же заявил: «Три секунды». Меня удивило отсутствие научного обоснования в этом замечании. «Иногда трех секунд может быть достаточно», — согласился я. — Но разве иногда это не будет слишком долго, а иногда — недостаточно?»

На следующем занятии я продемонстрировал метод, который гарантирует, что температура компонента будет оставаться близкой к температуре плавления припоя.

«Я согласен, что то, что вы показываете, работает», — сказал мне директор. — И что, вы ожидаете, что я скажу Адмиралтейству, что мы делали это неправильно?» Я больше там не бывал. С тех пор прошло более 30 лет, но хранители стандартов продолжают продвигать ошибочные методы.

И именно нам, производителям, следует заявлять о необходимости внесения изменений в стандарты, чтобы выпускаемая продукция становилась более надежной!



Комментирует Сергей ШИХОВ, директор по управлению проектами, «А-КОНТРАКТ»:

Данная статья привлекла наше внимание некоторой провокационностью в подаче материала. Чувствуется душевная боль автора от того, что производственный персонал обучают пайке не так, как нужно. А также продвигают стандарты, несоответствующие текущей ситуации. И я могу его понять!

В наших российских реалиях с точки зрения стандартов, возможно, и нет таких жестко установленных требований к технологическому процессу (традиционно все требования довольно расплывчаты), но встречаются противоречия и формулировки, допускающие неоднозначную трактовку.

Очень жаль, что автор так и не раскрыл свой уникальный метод пайки, который продемонстрировал американскому адмиралу.