

Стоимость герметизации алюминиевых корпусов

Джек ПОЛЛОК (Jack POLLOCK)

Проблемы герметизации алюминиевых корпусов модулей

Надежность герметичных уплотнений является серьезной проблемой в микроволновой электронике на протяжении последних более чем 35 лет. Хотя трудности с герметизацией возникали при использовании разных материалов корпусов и технологических процессов, нигде не приходится сталкиваться со столь значительными затруднениями, как при герметизации модулей в алюминиевых корпусах. Проведенный в течение последних семи лет неформальный опрос сотрудников компаний, занимающихся пайкой вводов в алюминиевые корпуса модулей, продемонстрировал чрезвычайно широкий разброс результатов при испытаниях на соответствие военным стандартам. Только несколько компаний уведомили об отсутствии каких-либо трудностей при герметизации модулей, но большинство опрошенных заявили о выявлении 15–40% брака на этапе заводских испытаний перед отгрузкой заказчику. Некоторые компании сообщили о еще более высоком проценте брака. В одной крупной компании брак доходил до 98%. Будучи неформальным, этот опрос, тем не менее, дал представление о масштабах проблемы герметизации алюминиевых корпусов. Хотя результаты опроса, на первый взгляд, кажутся ошеломляющими, они совершенно не удивляют, если исследовать конструкцию существующих вводов на предмет деформаций при воздействии циклических тепловых нагрузок. Более того, труднее понять, как получить сколь-нибудь значительный выход годной продукции, используя современные конструктивные решения вводов.

Глубинная причина возникающих проблем заключается в том, что существующие конструкции уплотнений для изделий микроволновой электроники вошли в обиход прежде, чем алюминий стал основным материалом для изготовления герметичных

Истинная стоимость герметичных уплотнений помимо первоначальных затрат должна включать расходы, связанные с технологическим браком. Оценка общих затрат, вызванных тем или иным конструктивным недостатком, — сложный и зачастую бесконечный процесс. Цель этой статьи — дать некоторые ориентиры для сравнительной оценки стоимости различных методов герметизации вводов в алюминиевых корпусах.

корпусов. В течение многих лет решать эту проблему пытались в основном путем совершенствования технологических процессов, изменений в составе гальванического покрытия и применения улучшенных припоев. Вот некоторые изменения, внедренные многими компаниями: замена золотого гальванического покрытия никелевым, оловянным или серебряным во избежание охрупчивания золота при пайке; многократное предварительное лужение золоченых деталей перед окончательной пайкой; использование припоев на основе индия для повышения пластичности паяного соединения.

Однако анализ накопленного опыта показал, что современные конструкции вводов недостаточно надежны даже без возникновения проблемы охрупчивания золота и при использовании более пластичных припоев. В качестве причины указывается тот факт, что современные конструкции не позволяют выдерживать в допустимых пределах деформации в паяном соединении. Без такого контроля припой подвергается избыточным деформациям в ходе термоциклических испытаний, и соединение нарушается за относительно небольшое число циклов. Перечисленные изменения привносят дополнительные проблемы и ограничения. Ни одно из альтернативных гальванических покрытий не обеспечивает такой же высокой надежности и повторяемости пайки, как золото, что приводит к большому объему переделок. Особенно трудно достичь повторяемого качества пайки при использовании никелевого покрытия даже при строгом контроле содержания примесей в покрытии и сроков хранения. Оловянное покрытие ограничивает температуру припоя, а следовательно, и выбор температуры последующего паек. Хотя предварительное лужение золотого покрытия позволило частично или полностью устранить проблему охрупчивания, оно не позволяет достигать повторяемого уровня герметичности и требует больших затрат. Во многих случаях предварительное лужение изменяет

заданные размеры деталей в такой степени, что делает невозможной их сборку. Наконец, применение дорогостоящих индиевых припоев ограничивает температуру последующих технологических процессов.

Хотя эти усилия и дали определенный прирост выхода годной продукции, основная проблема не исчезла, и компании смирились с низким выходом как с неизбежностью. Как это часто происходит, контакты между компаниями придали им уверенность в том, что большинство из них сталкиваются со сходными проблемами, и окончательного решения никто не нашел.

Модель затрат на герметизацию корпусов

В таблице 1 представлена модель затрат на герметизацию корпусов (общие затраты на герметизацию = общие затраты на стандартные изделия + общие затраты, связанные с браком). При работе с этой моделью важно свести все затраты к средним величинам. Попытка включить в нее все фактические затраты может сделать модель слишком громоздкой. Проведя испытания, можно определить те факторы, которые в наибольшей степени влияют на конечный результат. Эти решающие факторы можно затем оценить или анализировать более детально, не тратя усилий на несущественные аспекты. Модель состоит из таких статей затрат, как термоциклические испытания, испытания на герметичность, переделки, повторный контроль, проверка качества материалов, перепроверка электрических характеристик после выявления брака и неустраняемый брак.

Термоциклические испытания являются существенной статьей затрат. Обстоятельные испытания, предпринимаемые вследствие высокого процента брака, могут вызывать необходимость в новых капиталовложениях. Важно отметить, что высокий выход годной продукции, достигнутый за счет конструктивной оптимизации уплотнения,

Таблица 1. Модель затрат на герметизацию алюминиевых корпусов

Элемент модели затрат*	Затраты на стандартные изделия	Затраты, связанные с браком
Ввод	x	x
Пайка	x	x
Сборка	x	x
Термоциклические испытания	x	x
Испытания на герметичность	x	x
Переделки (в том числе контроль)		x
Перепроверка электрических характеристик		x
Комиссия по проверке качества материалов		x
Неустраимый брак		x

Примечание. * Все затраты должны включать соответствующие накладные расходы.

потенциально позволяет отказаться от части выполняемых в настоящее время стандартных испытаний, а также от дополнительных испытаний, связанных с браком. Как правило, нынешние программы испытаний составлены, исходя из традиционно высокого процента брака, и призваны стимулировать его проявление на как можно более ранних стадиях производственного процесса.

Испытания на герметичность также можно сократить аналогично термоциклическим испытаниям. Применение надлежащих конструктивных решений дает возможность избавиться не только от дополнительных, но и от некоторых проводящихся ныне базовых испытаний.

Очевидно, что переделки, особенно на поздних стадиях производственного процесса, сопряжены с ощутимыми затратами. Трудоемкость переделок значительно возрастает после установки на корпуса крышек или когда в корпуса модулей произведен монтаж компонентов. Повторный контроль необходим после любых переделок. Чем на более поздней стадии изготовления находится модуль, тем дороже обходится такой контроль. Перепроверка электрических характеристик может потребоваться после переделки и до возобновления стандартных испытаний, чтобы убедиться, что работоспособность модуля не пострадала. Необходимость во вмешательстве комиссии по проверке качества материалов может возникнуть, если разгерметизация выявлена при окончательной приемке. Дополнительные административные затраты, связанные с таким вмешательством, могут быть значительными, в зависимости от размера партии, в которой выявлен брак, и от процента брака в партии. Списание изделий с неустраимым браком может обойтись чрезвычайно дорого. Оценив затраты, обусловленные браком, можно получить представление об истинной стоимости герметизации. Это позволит в дальнейшем осознанно выбирать конструктивные решения.

На рисунке показана номограмма, представляющая добавленную себестоимость одного уплотнения как функцию трех пере-

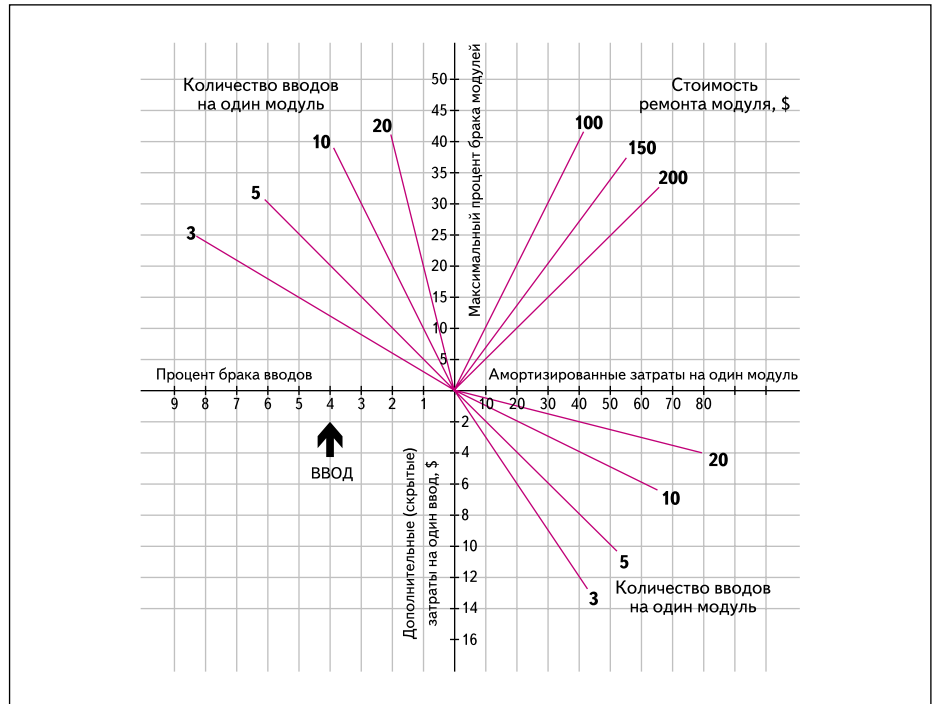


Рисунок. Стоимость уплотнения корпусов — номограмма

менных — процента брака, количества вводов в одном модуле и оценочной стоимости ремонта модуля. При входе на номограмму (стрелка) выберите процент брака, исходя из предположений или фактических данных за прошедшие периоды. Далее двигайтесь по вертикали до наклонной линии с требуемым значением количества вводов в корпусе, а затем от точки пересечения по горизонтали к вертикальной оси, на которой указан процент бракованных модулей. Этот процент максимален, поскольку в большой партии корпусов брак не обязательно будет равномерно распределен среди модулей, а следовательно, реальный процент брака может быть несколько меньше. После этого двигайтесь по горизонтали до наклонной линии с оценочной стоимостью ремонта модуля, а затем от точки пересечения по вертикали к горизонтальной оси, на которой отложена сумма затрат на амортизацию в расчете на один модуль. От горизонтальной оси двигайтесь вниз до наклонной линии с тем же количеством вводов на один модуль, что и при входе на номограмму, а от точки пересечения с ней по горизонтали к вертикальной оси, на которой указана сумма дополнительных затрат в расчете на один ввод. Прибавив эту сумму к базовым затратам, получим общую стоимость герметизации ввода.

В приведенном на рисунке примере (пунктирная линия) процент брака герметизации равен 4% для типичного модуля с пятью вводами. Стоимость ремонта модуля составляет \$150, что дает \$30 дополнительных затрат на амортизацию в расчете на модуль, или \$6 на один ввод. 4% брака — это еще невысокий показатель при использовании современ-

ных уплотнений. Как уже отмечалось ранее, средний процент брака по данным опроса существенно выше. Из этой номограммы следует, что единственный фактор, позволяющий существенно сократить затраты на герметизацию корпусов модулей, — это процент брака, так как число вводов фиксированное, а снизить связанные с браком затраты на переделку модуля не представляется возможным. Следует подчеркнуть, что стоимость ремонта, показанная на номограмме, должна отражать заданные моделью совокупные дополнительные затраты, связанные с браком.

В таблице 2 приведены наиболее распространенные в настоящее время конструктивные решения для герметизации алюминиевых корпусов. Решения А, В и С — это современные конструкции коаксиальных вводов (с буртиком и без него). Разброс стоимости герметизации для вводов этих конструкций существенно выше, чем у остальных трех вариантов. Он обусловлен большим объемом необходимых переделок в случае бракованных соединений. Здесь использовалась умеренно консервативная оценка стоимости ремонта в \$6–8 на один ввод, исходя из относительно низкого процента брака (4%) паяных соединений.

Герметизация с применением ввода для лазерной сварки (вариант D) характеризуется несколько меньшей общей стоимостью, которая полностью обусловлена стоимостью самого ввода. В наших расчетах типичный процент брака для этой конструкции принят равным нулю, хотя какой-то процент брака можно ожидать вследствие высокого уровня циклических напряжений, присутствующих в этой конструкции.

Таблица 2. Оценка различных конструкций уплотнений для алюминиевых корпусов

Вариант	A	B	C	D	E	F
Конструктивное решение	Металлостеклянный ввод/ оловянно-свинцовый припой	Металлокерамический ввод/ оловянно-свинцовый припой	Металлокерамический ввод или металлостеклянный ввод (сжатый спай)/ оловянно-свинцовые припой	Металлокерамический или металлостеклянный вводы/ для лазерной сварки	Металлостеклянный ввод/ припой на основе золота (Au/Sn, Au/Ge, Au/Si)	Совместимый с алюминием металлостеклянный ввод/ оловянно-свинцовые припой
Эффективно устраняет основной механизм возникновения брака, связанный с припоем	Нет	Нет	Нет	Да	Да	Да
Остаточные напряжения при комнатной температуре	Низкие, <3447 кПа (500 psi C)	Низкие, <3447 кПа (500 psi C)	Низкие, <3447 кПа (500 psi C)	Зависят от конструкции	Высокие, 186–276 МПа (27 000–40 000 psi C)	Низкие, <3447 кПа (500 psi C)
Максимальные циклические напряжения ² ΔStress	Умеренно низкие, равные напряжению текущей припоя (P/C)	Умеренно низкие, равные напряжению текущей припоя (P/C)	Умеренно низкие, равные напряжению текущей припоя (P/C)	Высокие, >207 МПа (30 000 psi P/C)	Высокие, 207 МПа (30 000 psi C)	Умеренно низкие, равные напряжению текущей припоя (P/C)
Максимальная деформация припоя, %	>35	>35	>35	–	–	Типовое <5%
Ограничение применения	Высокий процент брака пайки	Высокий процент брака пайки	Высокий процент брака пайки	Зависит от геометрии уплотнения (без тщательного анализа и/или испытаний существует высокий риск брака)	Зависит от геометрии уплотнения (без тщательного анализа и/или испытаний существует высокий риск брака)	Самые слабые ограничения на геометрию уплотнения
Диапазон стоимости ввода ³ , \$	1–2	8–12	1,5–3	7–11	1,5–3,5	1,5–2,5
Диапазон общей стоимости уплотнения с минимальными типовыми переделками ⁴ , \$	7–10	14–20	7,5–11	7–11	1,5–2,5	1,5–2,5
Фактор конструктивного риска	Низкий	Низкий	Низкий	От умеренного до высокого	Высокий	Низкий
Фактор технологического риска	Высокий	Высокий	Высокий	Умеренный	Высокий	Низкий

Примечания. ¹ Патент США № 4841101. ² По военному стандарту диапазон температур — от –65 до +125 °С. ³ Включает затраты на припой там, где это применимо.

⁴ Предполагается 4% переделок, кроме варианта F (0%). C — напряжение сжатия. P/C — напряжения растяжения и сжатия.

Вариант E представляет собой модификацию варианта A с применением припоев на основе золота вместо мягких припоев. Эта конструкция позволяет использовать современные способы пайки вводов, которые отличаются несколько меньшей ценой, однако преимущественно в цене сводится к нет высокой стоимостью золотосодержащих припоев. Поэтому по стоимости смонтированного ввода этот вариант сопоставим с вариантом F (ввод, совместимый с корпусом из алюминия).

Использование варианта E сопряжено с двумя потенциально дорогостоящими проблемами. Первая из них — это дополнительные термические напряжения, которым подвергается гальваническое покрытие на алюминии. Надлежащим образом нанесенное покрытие хорошо выдерживает нагрев до температуры 250...275 °С. Пайка припоями на основе золота (Au/Sn, Au/Ge и Au/Si) требует температур в диапазоне от 310 до 400 °С. Пайка алюминия с гальваническим покрытием при этих температурах влечет за собой значительный риск образования пузырей в покрытии. Такого рода дефекты приводят к росту затрат, так как переделка с высокой вероятностью означает

потерю герметичности с необходимостью снятия и повторного нанесения покрытия, а также повторной сборки. Если корпуса подвергались последующей машинной обработке для монтажа крышки лазерной сваркой или если на них наносилось гальваническое покрытие с маскированием, стоимость переделки гальванического покрытия существенно возрастает.

Второй фактор — это конструктивный риск, связанный с использованием припоев на основе золота. Эти припой достаточно прочны и по прочности даже сравнимы с твердыми припоями. Сжатие стекла в металлостеклянном вводе (в определенных пределах) играет позитивную роль. Однако в некоторых конструкциях имеет место локальная текучесть алюминия на границе уплотнения и возможно растрескивание ввода. Ряд популярных конструкций не обеспечивают необходимой надежности при использовании золотосодержащих припоев. Единственный выход из такой ситуации — прибегнуть к резервному варианту с вводами, совместимыми с алюминием, и к мягким припоям. Это может потребовать изменений в конструкции корпуса и/или использования вводов специальной

конструкции, а следовательно, соответствующих затрат. Отмечено немало случаев, когда резервный вариант конструкции не рассматривался, и поставить модули с требуемыми характеристиками не удавалось. Результатом были неисчислимые затраты и срывы сроков выполнения программ.

Вариант F — «алюминий-совместимая конструкция» с использованием мягких припоев. Она позволяет получить герметичное паяное соединение, которое надежно снимает все термические напряжения и выдерживает значительное число тепловых циклов без потери герметичности. «Алюминий-совместимая конструкция» уменьшает радиальную деформацию припоя приблизительно на порядок по сравнению с современными конструкциями герметичных вводов, в которых используются мягкие припой. Эта конструкция позволяет достичь нулевого процента брака, при котором стоимость одного уплотнения равняется сумме стоимости первоначального приобретения и сборки.

Примечание. Оригинал статьи был опубликован в Microwave Journal (September, 1997).