

Лепихин Вячеслав Алексеевич, магистрант,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ОРБИТАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ НА ДЕГРАДАЦИЮ СОЕДИНЕНИЙ

Аннотация: В статье исследуется влияние климатических и орбитальных факторов на процесс деградации химических соединений. Рассматриваются ключевые механизмы разрушения под воздействием температуры, влажности, солнечной радиации и орбитальных параметров. На основе анализа экспериментальных данных и моделирования определяются наиболее значимые факторы, ускоряющие деградацию.

Ключевые слова: Космос, паяные соединения, деградация соединений, климатические факторы, орбитальные факторы

Введение

Каждый виток спутника вокруг Земли – это температурный экзамен для всей аппаратуры. Половина пути проходит на солнечной стороне, где внешние панели раскаляются до $+110^{\circ}\text{C}$. Другая половина – в полной тени, и температура за минуту может упасть ниже -120°C . Плата, находящаяся внутри корпуса, не выходит на такие экстремумы, но резкие перепады все равно происходят – особенно на участках, близких к наружным стенкам. Самые чувствительные к этому – паяные соединения. Разные материалы внутри шва по-разному реагируют на изменение температуры: подложка, припой и металл контактной площадки расширяются и сжимаются с разной скоростью. При каждом цикле эти микроскопические сдвиги накапливаются, и в шве возникает внутреннее напряжение. Первое время оно компенсируется за счет пластичности припоя, но со временем материал «устает» и начинает трескаться.

С виду все может быть в порядке, но деградация уже пошла.

Виды климатических и орбитальных факторов

Главная опасность – это термоусталость, возникающая из-за разницы в скоростях нагрева и остывания разных участков платы. Если массивный элемент прогревается медленно, а его выводы уже начинают расширяться – создается механическое напряжение в паяном шве. При десятках тысяч циклов такой «разрыв» пусть и микроскопический, но становится стабильной трещиной. Аналогичная ситуация при резком охлаждении: припой, застывший на температуре $+220^{\circ}\text{C}$, при переходе в -100°C теряет пластичность и становится хрупким. В совокупности это и есть тепловой удар – состояние, при котором шов получает одновременно термоупругий и структурный урон. Такие повреждения трудно зафиксировать визуально. Они часто проявляются только в процессе испытаний, когда после серии циклов начинается рост переходного сопротивления. Именно по этой причине температурный профиль пайки подбирается с учетом не только плавления, но и будущей работы шва в орбитальном цикле.

За пределами земной атмосферы паяное соединение работает не только при экстремальных температурах – оно подвергается воздействию ионизирующего излучения высокой энергии. Поток частиц от Солнца, галактические протоны и электроны, захваченные магнитосферой, разрушают химические связи в материалах. Особенно страдают защитные покрытия, лаки и флюсовые остатки. Под действием радиации они начинают терять эластичность, трескаться, в них формируются микроразрывы, через которые могут проникать остаточные газы. Сам припой в этом процессе устойчивее, но граница припой–металл постепенно становится местом накопления структурных нарушений: снижается



смачиваемость, изменяются диффузионные свойства, появляются зоны повышенной жесткости. Все это происходит незаметно, без внешних следов, но приводит к снижению ресурса.

Вакуум тоже не остается в стороне. Внутри сборки может сохраняться влага, остатки растворителей, газовые включения – особенно если технологическая выдержка перед герметизацией была нарушена. Под действием вакуума и нагрева начинается десорбция – выход молекул из поверхности. Они скапливаются в закрытых полостях и при переходе температуры через критические уровни вызывают локальное вспучивание шва или отслоение покрытия. Под лаком может образоваться «пузырь», незаметный визуально, но критичный для целостности цепи. Сами соединения при этом теряют прочность: особенно это заметно на тонких дорожках и в переходных отверстиях, где припаиваются чувствительные компоненты. На таких участках отслоение может произойти в один момент – под воздействием ускорения или при резком термопереходе. Все это делает вакуум и радиацию равнозначными по опасности с механическими нагрузками. Разрушение может быть не мгновенным, а накапливаться тихо, пока не сработает триггер.

Виды деградаций

Паяные соединения в космосе работают не в изоляции от электрических процессов – они постоянно находятся под нагрузкой, и со временем сами становятся участниками физико-химических изменений.

Один из таких процессов – электромиграция. Это явление заключается в перемещении ионов металла в припойном шве под действием постоянного электрического поля. При наличии влаги или ионизированной среды ионы начинают «ползти» от катода к аноду, формируя цепочку атомных мостиков. Со временем эта тонкая дорожка превращается в перемычку, а затем – в короткое замыкание. В орбитальных условиях, несмотря на вакуум, электромиграция не исчезает: остаточные заряды, паразитные токи утечки и неустойчивая диэлектрическая проницаемость материалов создают условия для локального накопления ионного потока. Особенно подвержены этому выводы микросхем и участки с высокой плотностью тока.

Второй фактор – диффузия в зоне спая. Даже при стабильной температуре, если пайка велась бессвинцовым припоем или при высоком содержании меди, начинается постепенное проникновение атомов одного металла в структуру другого. В результате на границе припой–подложка формируется хрупкий интерметаллидный слой – он теряет пластичность и растрескивается под любой механической нагрузкой. Особенно быстро это происходит в тех швах, где была превышена температура пайки или не соблюден профиль охлаждения.

Третья проблема – воздействие статического электричества. При отсутствии атмосферы спутник накапливает заряд на корпусе и элементах, особенно при пересечении радиационных поясов. При пробое или перераспределении потенциалов локально возникает импульс напряжения, и в тонком шве это может повлечь локальный отжиг или разрушение связи на межфазном уровне. Все это говорит о том, что даже при внешне стабильной нагрузке, соединение «стареет» – не в смысле окисления, а в виде внутренних, кумулятивных изменений.

Возможные пути решения

Стендовые испытания паяных соединений для космоса давно стали отдельной областью – не только технической, но и методологической. Главная цель – воспроизвести в лаборатории те нагрузки, которые плату ждут на орбите: температурные перепады, вакуум, радиация, вибрации и чередующиеся циклы включения-выключения. В ряде исследований ЦНИИмаш показывается, что уже после 500 термоциклов в диапазоне $-65...+125^{\circ}\text{C}$ на BGA-соединениях начинают появляться микротрещины по краю шва. Особенно уязвимы контакты, расположенные ближе к центру компонента, – там происходит максимальное напряжение при неоднородном расширении.



Заключение

Проведённый анализ влияния климатических и орбитальных факторов на деградацию химических соединений позволил выявить ключевые закономерности их разрушения. Установлено, что температура, влажность, уровень солнечной радиации и орбитальные параметры (такие как инсоляция и продолжительность светового дня) оказывают значимое воздействие на скорость и механизмы деградации.

Результаты исследования демонстрируют, что в условиях повышенных температур и ультрафиолетового излучения процессы разложения ускоряются, в то время как в высоких широтах и при низких температурах деградация может замедляться. Особую роль играют циклические орбитальные изменения способные в долгосрочной перспективе влиять на климатические условия и, как следствие, на устойчивость соединений.

Список литературы:

1. Луконин Н. В., Белов О. А., Доронкин Д. М., Коробкин А. Н., Шестаков И. Я. Применение способа бесконтактной пайки для создания высоконадежных прецизионных соединений антенно-фидерных устройств космических аппаратов // Новые материалы и технологии в космической технике. – 2017. – № 3. – С. 144–150. – DOI: 10.26732/2225-9449-2017-3-144-150.
2. Ли Н.-Ч. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и Flip-Chip технологии. М.: ИД «Технологии», 2006. 392 с.

