

УДК 621.3.049.75
На правах рукописи

Можаров Владимир Александрович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СОВМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
МЕЖСОЕДИНЕНИЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ СТРУКТУРАХ**

Специальность 05.11.14 – Технология приборостроения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре «Технология приборостроения» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель:

Медведев Аркадий Максимович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Назаров Александр Викторович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»,

Ведущая организаци

У2029076 ведущий инженер
Можаров В.А.
Обеспечение
пространственного
совмещения элементов
межсоединений в многосло...
2013

-исследовательский
«Техномаш», г. Москва

0-00 14 часов 30 минут на
государственном
5, г. Москва, 2-ая

202 9076

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока.

м. Н.Э. Баумана.

лярах,
зу на 1

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
2029076
Можаров В.А. Обеспечение

Цветков Ю.Б.

2782

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Печатные платы (ПП) являются основной сборочной единицей современной электронной и электротехнической аппаратуры любого назначения.

С 2012 года в Российской Федерации запущена государственная программа «Развитие авиационной промышленности на 2013 - 2025 годы», в которой особое место уделяется развитию производства высокотехнологичной и конкурентоспособной авионики. В ходе реализации этой программы предполагается, в том числе, модернизация производственных мощностей, отладка производственных процессов, соответствующих мировому уровню, и внедрение современных технологий. Перечисленные задачи позволят улучшить массогабаритные характеристики бортовой аппаратуры летательных аппаратов (ЛА), что, в свою очередь, потребует использования высокоинтегрированной элементной базы и уменьшения размера монтажных подложек, что приведет к увеличению плотности межсоединений электрических модулей.

Однако увеличение плотности межсоединений неизбежно связано с уменьшением их элементов, что создаёт проблемы в обеспечении надежности ПП и аппаратуры в целом, что недопустимо для аппаратуры ответственного назначения.

Одна из основных проблем, которая вызывает снижение надежности при увеличении плотности межсоединений – рассовмещение слоёв многослойных печатных плат (МПП), вызванное деформацией материала подложки и погрешностями технологического характера. Для обеспечения совмещения слоёв предосудительно было бы увеличивать размер контактных площадок (КП), так как это ограничивает возможности миниатюризации. В свою очередь, уменьшение размеров КП создает проблемы пространственного совмещения элементов межсоединений в многослойных структурах печатных плат. Решению этой проблемы посвящена данная работа.

Методы проектирования топологии и обеспечения качественного совмещения элементов межсоединений в многослойных печатных структурах не менялись более 20 лет. Они не учитывают факторов, влияние которых стало актуально с уменьшением размеров элементов межсоединений в современном производстве. Это приводит к значительному объему брака и значительному увеличению стоимости МПП 6 и 7 классов по ГОСТ Р 53429-2009.

Предмет исследований выполненной работы состоит в поддержании тенденции увеличения плотности компоновки современной авионики с обеспечением достаточного для данной отрасли уровня надежности и снижения

затрат на производство, в условиях, когда размеры КП приближаются к величинам, соответствующим деформации МПП при прессовании, а существующие методы расчета КП не обеспечивают надежности совмещения.

Начало таких исследований положили советские и российские ученые: чл.-корр. РАН, д.т.н. Шахнов В.А., д.т.н. Цветков Ю.Б., д.т.н. Медведев А.М., д.т.н. Галецкий Ф.П., к.т.н. Иевлев В.И. и др.; а также зарубежные ученые Эдвард Рент (Edvard Rent), Пауль Валднер (Paul Waldner) и др. Однако, из-за высоких темпов развития элементной базы и технологий межсоединений, изменились принципы обеспечения надежности, изменился предмет исследований, и, следовательно, новое время потребовало новых подходов.

Цель и задачи работы

Цель работы заключается в повышении плотности межсоединений в многослойных печатных структурах, в сочетании с поддержанием необходимого уровня надежности и улучшения массогабаритных показателей электронных модулей (печатных узлов) бортовой аппаратуры современных летательных аппаратов без значительного увеличения себестоимости конечной продукции.

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

1. анализ факторов, влияющих на деформацию базового материала, которая сказывается на точности совмещения;
2. разработка методики оценки показателей деформации базового материала;
3. разработка более достоверных методов расчета размера КП, сочетающих показатели реальных условий производства и необходимый уровень надежности межсоединений;
4. разработка технологических методов, позволяющих улучшить совмещение КП.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – элементы совмещения в многослойных печатных структурах и их материальные носители.

Теоретические исследования и проведенный анализ основывались на использовании методов экспертных оценок, теории вероятности и математической статистики, линейной алгебры и теоретических основ проектирования технологических процессов.

Научная новизна работы

1. Разработана более достоверная математическая модель зависимости появления ослабленных межсоединений (ненадежное совмещение КП) в МПП от факторов технологического процесса и свойств материала, учитывающая ранее не учитываемые факторы и позволившая повысить плотность межсоединений МПП и, как следствие, улучшить характеристики печатных узлов в целом.

2. Разработана математическая модель зависимости деформации базового материала от его характеристик, используемая на этапе технологической подготовки производства МПП, позволившая повысить выход годных и, тем самым, снизить себестоимость.
3. Разработан и внедрен метод компенсации деформационных изменений слоёв, учитывающий их характеристики, основанный на введении корректирующих коэффициентов при формировании рисунка слоёв и позволивший повысить плотность межсоединений и максимальный размер МПП.
4. Разработан и внедрен метод компенсации деформации спрессованной заготовки и погрешности её базирования на этапе сверления переходных отверстий, основанный на пересчете координат формируемых отверстий по изменению координат меток после прессования слоев, позволивший увеличить плотность межсоединений и максимальный размер МПП.

Степень достоверности полученных результатов определена обоснованностью допущений теоретических моделей путем сравнения с практическими результатами изготовления многослойных печатных плат с высокой плотностью межсоединений в реальных условиях производства, сопоставлением с данными других опубликованных работ и непротиворечивостью физическим законам. Идеи исследования базируются на обобщении практического опыта производства МПП высокого класса точности и передовом опыте автоматизации процессов технологической подготовки производства.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Расчет поправки на усадку для компенсации рассовмещения слоёв МПП, основанный на установленной экспоненциальной зависимости усадки от толщин меди и диэлектрического основания базового материала.
2. Зависимость вероятности появления ослабленных соединений от деформационных свойств базового материала и типа базирования при прессовании МПП.
3. Увеличение плотности межсоединений посредством использования модернизированного технологического процесса изготовления МПП, основанного на компенсации усадки базового материала на технологических этапах формирования проводящего рисунка и сверления переходных отверстий.

Практическая значимость

Разработанные в диссертации математические модели, методы компенсации и рекомендации по снижению деформации позволили осуществить переход к более достоверным проектным нормам при условии обеспечения требуемой стабильности технологического процесса и повысить эксплуатационные свойства бортовой

аппаратуры за счет улучшения массогабаритных характеристик МПП при стабильной надежности.

Основной практической ценностью диссертационной работы является увеличение плотности межсоединений на 10-30% за счет обеспечения совмещения слоёв МПП без снижения показателей надежности и увеличения стоимости изготовления.

Реализация и внедрение результатов работы

Разработанные в диссертации математические модели, методы обеспечения совмещения и рекомендации при проектировании МПП используются в ОАО «Концерн «Моринформсистема-Агат» г. Москва, использованы в опытно-конструкторской работе ООО «Остек-Сервис-Технология» г. Москва и внедрены в учебный процесс на кафедре «Технология приборостроения» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный технический университет)».

Апробация работы

Основные положения и результаты работы представлялись и докладывались на Научно-технической конференции «Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов», Москва, 2011 г., Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2012», Москва, 2012 г., 11-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика -2012», Москва, 2012 г.

Публикации

Основное содержание диссертации отражено в 13 научных работах, из них 2 опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора

Все научные результаты, включенные в диссертационную работу и представленные к защите, получены, доложены и опубликованы лично автором. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, состоял в постановке задач, выборе методов их решения, определении направленности экспериментальных исследований, разработке основных принципов проектирования электронных устройств, прогнозирования развития техники межсоединений электронных средств, разработке теоретических основ проектирования межсоединений в электронных системах бортового оборудования ЛА.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав с выводами, общих выводов, списка используемых сокращений и списка литературы. Общий объем работы – 149 страниц. Работа содержит 80 рисунков, 26 таблиц и 94 библиографические ссылки.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка сокращений и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, кратко охарактеризованы научная и практическая значимость результатов работы, указаны теоретические и методологические основы исследования. Приведены сведения о распределении материала по разделам работы.

В первой главе охарактеризовано современное состояние и обозначены основные тенденции развития микроэлектронных компонентов и производства монтажных подложек радиоэлектронной аппаратуры. Повышение быстродействия логических элементов должно сопровождаться максимально возможным снижением задержек в межсоединениях, т.е. сокращением их длины. Это достигается повышением степени интеграции логических элементов, более плотной компоновкой микросхем на платах за счет увеличения плотности межсоединений и сокращения длин линий связи, которая, в свою очередь, напрямую связана с точностью реализации заложенной в проекте конструкции МПП.

Произведен анализ основных направлений увеличения количества и плотности межсоединений. На сегодняшний день это: уменьшение размера КП; уменьшение ширины проводников и зазоров; увеличение количества слоёв; использование многоуровневых соединений; использование пространственных структур; использование встроенных компонентов.

Анализ проведён по следующим критериям: увеличение трассировочного пространства; уменьшение длины соединений; низкая стоимость подготовки производства; низкая стоимость изготовления; надежность производимой продукции.

В результате анализа определено, что к перспективным для исследования методам увеличения плотности межсоединений относятся увеличение количества слоёв, уменьшение КП и использование многоуровневых соединений. Все они требуют качественного совмещения слоёв МПП. Невозможность обеспечения этого требования приводит к вынужденному увеличению размеров КП. Таким образом, встаёт задача повысить качество совмещения слоёв и уменьшить размер КП.

Во второй главе произведен анализ наиболее распространённых на данный момент методов изготовления печатных плат, с целью определения технологических операций, влияющих на качество совмещения.

Выделенные в результате анализа операции подробно рассмотрены на предмет вносимых ими погрешностей, часть из которых значительно влияет на точность совмещения элементов межсоединений, а влиянием оставшихся можно пренебречь. На рисунке 1 показана величина влияния основных операций на точность производства МПП.

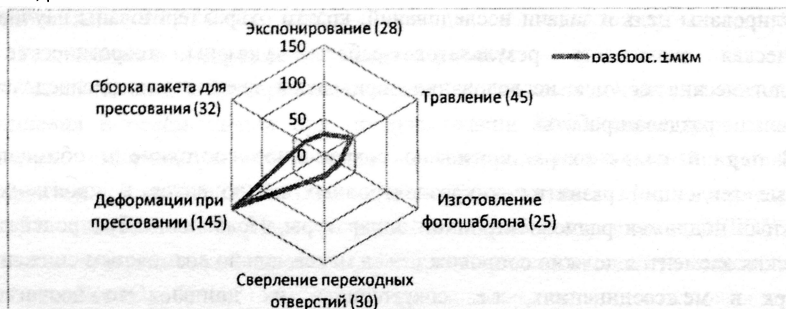


Рисунок 1. Величины погрешностей на различных этапах производства МПП

Как видно из рисунка 1, наибольший вклад в итоговое рассовмещение вносит этап прессования. Это обусловлено деформацией базового материала вследствие термических и механических воздействий. На данный момент деформацию базового материала слоёв компенсируют большим размером КП, что ведет к уменьшению трассировочного пространства. Таким образом, для максимального использования площади ПП, необходимо определить минимальный размер КП, который обеспечит заданную надежность МПП.

При использовании традиционных методов расчета размера КП невозможно обеспечить надежность совмещения слоев МПП с высокой плотностью межсоединений, так как размер КП приближается к величинам деформации слоев при прессовании. Частично эта проблема решается изготовлением нескольких тестовых образцов, необходимых для корректировки технологического процесса и конструкции, однако для производства бортовой аппаратуры авиационной и ракетно-космической техники этот метод не применим, так как, во-первых, не обеспечивается требуемая надежность аппаратуры, а, во-вторых, резко повышается себестоимость конечной продукции.

Изначально верно рассчитанные технологические нормы производства и параметры конструкции дают возможность сэкономить трассировочное пространство на плате, не ухудшая показатели надежности устройства и снижая его себестоимость.

На основе вышеизложенного сформулированы цели и задачи диссертационной работы: разработать более достоверный метод расчета размера КП, учитывающий

ранее не учитываемые факторы (деформационные показатели базового материала и тип системы базирования при прессовании) и разработать технологические методы, позволяющие улучшить пространственное совмещение слоёв МПП.

В третьей главе рассмотрены основные методы расчета и обеспечения совмещения и показаны их недостатки с точки зрения современного производства. Общий недостаток всех методов заключается в том, что они не учитывают тип системы совмещения и базирования, используемые в современном производстве прецизионных МПП и оказывающие огромное влияние на конечное совмещение. При этом деформационные изменения координат печатных элементов в процессе прессования принимаются как случайные и не компенсируемые, что тоже неверно.

Для оценки деформационных свойств материала в работе проанализирована и доработана общая методика Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) IEC-61189-2-2X02, которая используется для измерения показателей геометрической стабильности базового материала. Суть доработки заключается в назначении реперных знаков и определении порядка прессования тестового образца. В результате выполнения уточненной методики, получаем следующие вероятностные характеристики деформационных параметров материала: m_x , m_y – математическое ожидание коэффициента усадки по оси утка/основы после этапа прессования; σ_x , σ_y – среднеквадратичное отклонение коэффициента (СКО) усадки по оси утка/основы после этапа прессования. Эти вероятностные характеристики можно использовать для определения величины отклонения элементов межсоединений, формируемых на базовом материале.

Классическая формула для расчета диаметра КП статистическим методом имеет вид:

$$D = d + 2G + 2\Delta_T^{\Sigma} \quad (1)$$

где D – минимальный диаметр контактной площадки; d – диаметр отверстия; G – минимальная ширина гарантированного пояска охвата отверстия; Δ_T^{Σ} – величина суммарной погрешности технологического характера (обычно в величину Δ_T^{Σ} включают и погрешность положения элемента совмещения в пространстве, обусловленную деформацией базового материала).

Новый подход к расчету размера КП должен учитывать ранее не учитываемые факторы, и заключается:

1. В выделении в отдельное слагаемое погрешности, обусловленной деформацией базового материала.
2. В учёте зависимости деформации базового материала от системы базирования при прессовании МПП с помощью отдельного коэффициента.

3. В использовании КП эллипсной формы, чтобы учитывать различные показатели усадки базового материала по утку и основе.

Использование эллипсной формы КП позволяет увеличить плотность межсоединений в МПП (рисунок 2), учитывая разность деформационных свойств базового материала по осям основы и утка, без ухудшения качества совмещения слоёв МПП.

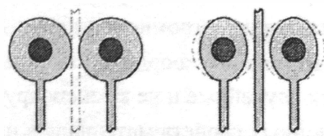


Рисунок 2. Пример увеличения плотности межсоединений при использовании эллипсной КП

В результате анализа получены формулы для расчета параметров эллипса КП:

$$a = \frac{d}{2} + G + \frac{\Delta \Sigma}{2} + s_x \left(|1 - m_x| \cdot \frac{L_x}{2} + 6\sigma_x \frac{L_x^2}{L_0} \right) \quad (2)$$

$$b = \frac{d}{2} + G + \frac{\Delta \Sigma}{2} + s_y \left(|1 - m_y| \cdot \frac{L_y}{2} + 6\sigma_y \frac{L_y^2}{L_0} \right) \quad (3)$$

где a , b – радиусы эллипса; s_x , s_y – коэффициенты, зависящие от системы базирования при прессовании для утка и основы; L_0 – идеальная длина между метками во время тестирования материала; L_x , L_y – длины сторон заготовки МПП по оси утка и основы соответственно.

Коэффициенты s_x , s_y – эмпирические величины, определяемые технологом. Эти коэффициенты зависят от системы базирования при прессовании. В результате проведенных экспериментов и опыте применения различных систем прессования, определена степень влияния MAS-LAM (бесштифтовых) и PIN-LAM (штифтовых) систем на деформацию одного и того же базового материала (таблица 1).

Таблица 1.

Коэффициенты, зависящие от типа совмещения при прессовании

Тип системы совмещения		s_x	s_y
MAS-LAM		1	1
PIN-LAM	По 2-м отверстиям	1	1,5
	По 4-м отверстиям	1,5	1,5
	L-конфигурация	2	2

В случае невозможности использования КП эллипсной формы по каким-либо причинам, можно использовать КП классической круглой формы:

$$D = d + 2G + \Delta_T^{\Sigma} + \max[s_x, s_y] \left(\left(1 - \max[m_x, m_y] \right) \cdot L + 12 \cdot \max[\sigma_x, \sigma_y] \cdot \frac{L^2}{L_0} \right) \quad (4)$$

Конструкционная надежность трансверсальных соединений в трехмерных структурах МПП для круглой формы КП обеспечивается при условии:

$$\Delta_T^{\Sigma} + \max[s_x, s_y] \left(\left(1 - \max[m_x, m_y] \right) \cdot L + 2 \cdot n \cdot \max[\sigma_x, \sigma_y] \cdot \frac{L^2}{L_0} \right) < D - (d + 2G) \quad (5)$$

где n – количество интервалов среднеквадратичного отклонения ($\pm\sigma$).

В таблице дано количество появляющихся дефектов в длительном производственном процессе с плавающим средним значением в пределах $\pm 1,5\sigma$.

Таблица 2.

Количество дефектов при выборе разных интервалов СКО

Кол-во инт. СКО ($\pm\sigma$)	Выход годных, %	Дефектов на миллион ед.
2	69,15	308 537
3	93,32	66 807
4	99,379	6 210
5	99,9676	233
6	99,99966	4

Таким образом, выбирая из таблицы 2 значения количества интервалов СКО (n) и подставляя их в формулу (5), получим значения диаметра КП с заданным количеством ослабленных соединений. Такой подход позволяет минимизировать размеры элементов межсоединений при различных требованиях к надежности МПП.

Деформация базового материала зависит от толщины меди и от толщины стеклотекстолита. Обобщив и проанализировав данные, полученные в ходе применения описанной выше методики оценки деформационных свойств, и данные, заданные производителем, при помощи регрессионного анализа был определен общий вид функции и коэффициенты регрессии для базового материала ISOLA IS680-333. Общий вид зависимости поправки на усадку от толщин диэлектрика и меди выглядит следующим образом:

$$c(t, h) = (k_0 + k_1 \cdot t) \cdot e^{k_2 \cdot h} \cdot e^{k_3 \cdot t}, h \in [0,05; 0,5], t \in [0; 0,21] \quad (6)$$

где $k_0..k_3$ – коэффициенты, определяемые для каждого материала, t – толщина меди и h – толщина диэлектрического основания базового материала.

И частный случай зависимости для материала ISOLA IS680-333:

$$c(t, h) = (1,636 \cdot 10^{-3} - 9,106 \cdot 10^{-3} \cdot t) \cdot e^{-4,441 \cdot h} \cdot e^{14,808 \cdot t}, \\ h \in [0,05; 0,5], t \in [0,018; 0,21]$$

Построен график полученной зависимости $c = f(t, h)$ для материала ISOLA IS680-333 с наложением реально измеренных значений (рисунок 3).

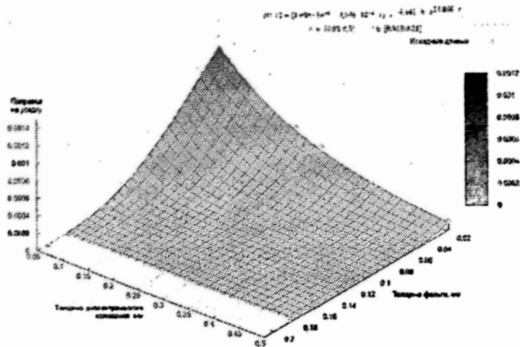


Рисунок 3. График функции $c(t, h)$ для материала ISOLA IS680-333

Полученная зависимость позволяет, определив поправку на усадку для 4-5 различных типов базового материала одной марки, рассчитывать значения поправки для любого другого типа из всей номенклатуры базового материала. Тем самым снижается стоимость и время внедрения новых марок материала на производстве.

Для компенсации постоянной составляющей деформации базового материала $m_{x,y}$ вводится масштабный коэффициент для соответствующих фотошаблонов. Рассчитывается он для каждой оси (основы или утка) отдельно, по формулам, приведённым ниже:

$$u_x = 1/m_x = 1 + c_x \text{ и } u_y = 1/m_y = 1 + c_y \quad (7)$$

где $u_{x,y}$ – масштабный коэффициент по определенной оси.

Поправка на усадку $c_{x,y}$ связана с $m_{x,y}$ следующим соотношением:

$$1/m_{x,y} = c_{x,y} + 1 \quad (8)$$

Масштабный коэффициент для базового материала слоя можно вычислить аналитически, опираясь на зависимости (6),(7) и (8):

$$u_x = 1 + (k_{x0} + k_{x1} \cdot t) \cdot e^{k_{x2} \cdot h} \cdot e^{k_{x3} \cdot t}, \quad u_y = 1 + (k_{y0} + k_{y1} \cdot t) \cdot e^{k_{y2} \cdot h} \cdot e^{k_{y3} \cdot t}$$

где $k_{x0}, k_{x3}, k_{y0}, k_{y3}$ – коэффициенты, определяемые для каждого материала (оси основы и утка соответственно).

Обнаружено, что незаполнение медью пробельных мест на слоях МПП значительно увеличивает рассеяние коэффициента усадки базового материала, а также негативно влияет на травильный раствор. Как следствие – вносится серьезная погрешность расположения и размера межслойных соединений, особенно на тонких основаниях. Поэтому желательно всегда, но рекомендуется в обязательном порядке

при проектировании МПП 5 класса точности и выше, а также плат для авионики и космической техники не оставлять на слоях МПП пустот, не заполненных медью.

Финальным этапом, который и определяет качество совмещения, является операция сверления заготовки МПП. На этом этапе нужно компенсировать величины Δ_T^Σ и $m_{x,y}$, где они носят наиболее критичный характер. ввиду того, что непопадание (рисунок 4) или частичное попадание сверла в «ромашку» контактных площадок приводит к неработоспособности или снижению надежности МПП.

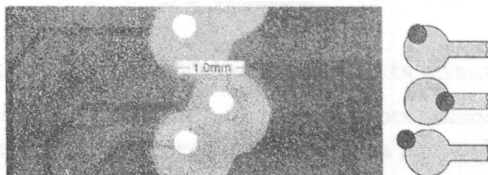


Рисунок 4. Рентгеновский снимок МПП с недопустимым непопаданием в КП (слева), нежелательные (верхнее справа) и недопустимые смещения переходного отверстия относительно КП (среднее и нижнее справа)

В реальности, из-за наличия в заготовке непредсказуемых неоднородностей различного характера (неравномерное заполнение медью слоев; неоднородность основы и наполнителя базового материала) и случайных погрешностей технологического процесса, заготовка МПП после прессования меняет свою форму. Условно изменения формы можно изобразить так, как показано на рисунке 5.

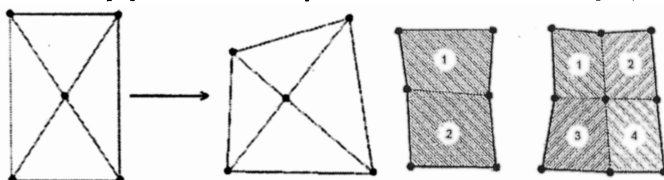


Рисунок 5. Изменение формы заготовки МПП

Для исключения систематической погрешности усадки базового материала, необходимо:

1. Предусмотреть специальные реперные знаки на слоях МПП.
2. Оценить положение реперных знаков относительно ноля сверлильного станка (при помощи оптического измерителя).
3. Произвести перерасчет координат сверления переходных отверстий для компенсации деформации заготовки.

Реперные знаки для определения деформации необходимо располагать на технологическом поле заготовки МПП. Форма и размеры зависят от используемого

на производстве оборудования. Рекомендуемые места их расположения представлены на рисунке 6.

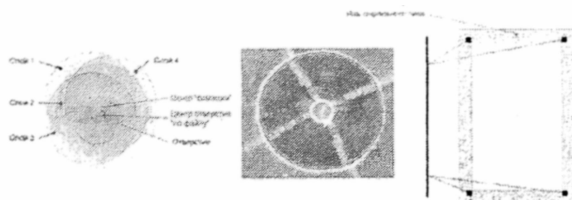


Рисунок 6. «Ромашка» из контактных площадок и реперов на разных слоях

Изменение формы, изображенное на рисунке 5, называется аффинным отображением, с известными координатами начальных и конечных реперных точек. Начальные координаты заданы в самом проекте, а конечные определяются измерением каким-либо образом (вручную, видеокамерой или рентгеновским машинным зрением) координат центра «ромашки» реперных контактных площадок (рисунок 6). Достаточно наличие 4-х реперов, но может быть и больше (точек должно быть четное количество) для более полного учета изменения формы заготовки.

Используя измеренные для каждой конкретной заготовки координаты усреднённого смещения реперных знаков, рассчитываются коэффициенты a , b , a_1 , b_1 , c_1 , a_2 , b_2 и c_2 . Затем, используя координаты отверстия $\{p, q\}$, согласно полученным коэффициентам производится перерасчет координат для программы сверления МПП, используя следующие формулы:

$$x = \frac{p(b_2 - c_2 \cdot b) + q(b \cdot c_1 - b_1) + (b_1 c_2 - b_2 \cdot c_1)}{p(b \cdot a_2 - b_2 \cdot a) + q(b_1 \cdot a - b \cdot a_1) + (b_2 \cdot a_1 - b_1 \cdot a_2)} \quad (9)$$

$$y = \frac{p(a_2 - c_2 \cdot a) + q(a \cdot c_1 - a_1) + (a_1 c_2 - a_2 \cdot c_1)}{p(b \cdot a_2 - b_2 \cdot a) + q(b_1 \cdot a - b \cdot a_1) + (b_2 \cdot a_1 - b_1 \cdot a_2)} \quad (10)$$

По вычисленным при помощи выражений (9) и (10) координатам производится сверление переходных отверстий.

Таким образом, подготовлена математическая и технологическая база для поддержания тенденций увеличения плотности межсоединений.

В четвертой главе представлены экспериментальные данные, показаны преимущества предлагаемых методов обеспечения совмещения и намечены направления их дальнейшего развития.

Разработанные методы позволяют определить минимальный размер КП, достаточный для обеспечения совмещения слоёв МПП при заданных параметрах надежности.

На рисунке 7 представлены графики зависимости минимального диаметра контактной площадки, требуемого для обеспечения качественного совмещения слоёв МПП, от длины наибольшей стороны печатной платы для различных типов производств с использованием в качестве базового материала стандартного FR4, рассчитанные по формуле (4).

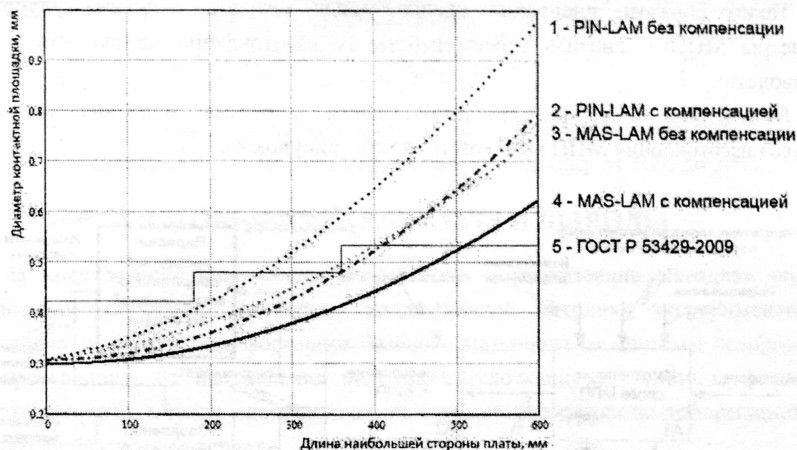


Рисунок 7. Зависимость минимального диаметра контактной площадки от длины наибольшей стороны печатной платы для различных типов производства

Минимальный диаметр КИ, устанавливаемый в ГОСТ Р 53429-2009 (линия 5 на рисунке 7) не учитывает изменение величины деформации материала при увеличении размера заготовки. На графике видно, что при увеличении размера заготовок требуемый для обеспечения качественного совмещения слоёв размер КИ также возрастает и это приводит к тому, что на производстве требования ГОСТа невозможно выполнить при длине ПП свыше 400 мм (линии 1 и 3). Предлагаемые методы компенсации усадки слоёв позволяют эту длину увеличить до 500 мм при использовании системы бесштифтового базирования MAS-LAM (линия 4) на этапе прессования, обеспечивая заданный гарантийный пояс КИ, и соответственно, качественное совмещение элементов межсоединений. Кроме того, использование предлагаемых методов компенсации слоёв позволяет достичь показателей совмещения дорогостоящих систем MAS-LAM на существующем оборудовании PIN-LAM (линия 2).

Также экспериментально установлено, что использование термостабилизации улучшает вероятностные показатели деформации материала m_x и m_y как минимум в

полтора раза. Поэтому термостабилизация базового материала играет большую роль в стабильности производства, позволяя существенно сократить размеры элементов межсоединений. Однако этим технологическим этапом на производстве зачастую пренебрегают, хотя производство прецизионных МПП без неё представляется нецелесообразным.

Таким образом, внедрение предложенных методов позволяет улучшить параметры МПП и снизить себестоимость их изготовления на существующем производстве.

Полученные в работе результаты легли в основу модернизированного процесса изготовления МПП высокой точности (рисунок 8).

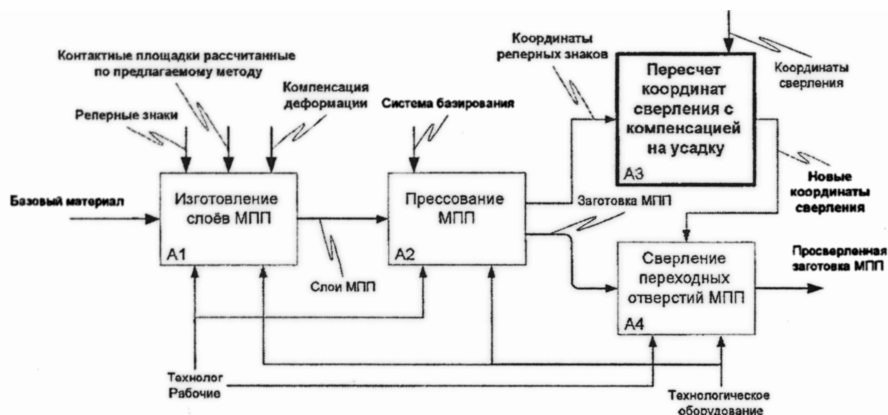


Рисунок 8. Схема процесса изготовления МПП с применением методов компенсации деформации слоёв

На этапе технологической подготовки производства на слои добавляются реперные знаки, размеры КП рассчитываются по новым методам, вводятся поправочные коэффициенты, которые позволяют внести формируемый рисунок слоёв компенсирующие их деформацию изменения. Перед операцией сверления переходных отверстий вводится дополнительный этап измерения положения реперных знаков и пересчета координат сверления с учетом погрешностей системы базирования заготовки на столе станка и деформационных погрешностей заготовки. Этот дополнительный этап позволяет значительно повысить точность попадания сверла в «ромашку» переходных отверстий, тем самым обеспечивая возможность уменьшения размера элементов межсоединений при заданном уровне надежности.

Рассчитаны числовые показатели выигрыша в трассировочном пространстве для плат различного класса точности (таблица 3), изготавливаемых на заготовке

длиной 300 мм при различных методах компенсации рассовмещения, на расстоянии в 1,1 мм между КП.

Таблица 3.

Показатели выигрыша в трассировочном пространстве на шаге 1,1 мм

Параметры МПП		5 класс	6 класс	7 класс
ГОСТ Р 53429-2009	Диаметр КП, мм	Ø0,48	Ø0,32	Ø0,27
	Кол-во трасс между КП, шт.	2	4	7
Предлагаемый метод расчета	Диаметр КП, мм	Ø0,38	Ø0,27	Ø0,24
	Кол-во трасс между КП, шт.	3	5	8

Из расчетов видно, что предлагаемые методы обеспечения совмещения слоёв позволяют увеличить плотность межсоединений на величину от 10% до 30%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения работы разработана и реализована методика оценки деформации материала. На основе предложенной методики экспериментально определена зависимость деформации базового материала от системы базирования при прессовании, от направления волокон стеклоткани, от толщины фольги и стеклотекстолита, а также оценено влияние термостабилизации на деформационные показатели базового материала.

На основе определенных зависимостей и проведенных исследований сделаны следующие научные выводы:

- 1) Тип системы базирования на технологическом этапе прессования оказывает влияние на итоговую погрешность совмещения.
- 2) Деформационные показатели базового материала экспоненциально зависят от его характеристик (толщин фольги и диэлектрика).
- 3) Разработана математическая модель зависимости вероятности возникновения ослабленных соединений в МПП от факторов технологического процесса производства, размера заготовки, деформационных свойств материала и типа системы базирования при прессовании.
- 4) Разработан метод компенсации деформации слоёв, учитывающий их характеристики, основанный на введении корректирующих масштабных коэффициентов при формировании рисунка слоёв.
- 5) Разработан метод компенсации деформации спрессованной заготовки и погрешности её базирования на этапе сверления переходных отверстий, основанный на пересчете координат отверстий по изменению координат меток после прессования слоев.

Практические результаты работы заключаются в следующем:

- 1) Внесены изменения в технологический процесс производства МПП, позволившие увеличить плотность межсоединений МПП на 10-30%.
- 2) Разработаны нормы проектирования конструкции МПП с целью уменьшения неоднородности их деформации.
- 3) Предложена более достоверная методика расчета размеров контактных площадок. Расчет по предложенной методике обеспечивает необходимую надежность совмещения слоев в соответствии с современными требованиями к обеспечению надежности МПП.
- 4) Предложено изменение формы контактной площадки с круглой на эллипсную, что позволяет без ухудшения показателей их надежности, увеличить плотность межсоединений в МПП.
- 5) Продемонстрирована зависимость минимального размера КП от размера заготовки ПП для различных вариантов технологических процессов, показывающая преимущества предлагаемых методов компенсации деформации базового материала ПП.

Общий итог работы заключается в создании теоретических положений выбора оптимальных проектных решений в практике исследований и разработки систем межсоединений электронных устройств бортовой аппаратуры ЛА и другого специального назначения, ориентированных на поддержание высокого уровня надежности в условиях постоянно увеличивающейся плотности компоновки высокоинтегрированной элементной базы и уменьшающихся размеров элементов межсоединений, реализуемых на основе многослойного печатного монтажа.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Медведев А.М., Можаров В.А., Мылов Г.В. Печатные платы. Базовые материалы. Фольги // Производство Электроники. 2012. №1. С. 12–17.
2. Медведев А.М., Можаров В.А. Испытания базовых материалов печатных плат // Производство электроники. 2011. № 6. С. 17–22.
3. Медведев А.М., Можаров В.А., Мылов Г.В. Печатные платы. Электрические свойства базовых материалов // Печатный монтаж (приложение к журналу «Электроника. НТБ»). 2011. № 6. С. 150–157.
4. Медведев А.М., Можаров В.А. Размерная стабильность слоев прецизионных многослойных печатных плат // Печатный монтаж (приложение к журналу «Электроника. НТБ»). 2011. № 4. С. 140–147.

5. Медведев А.М., Можаров В.А. Плотность межсоединений электронных компонентов // Печатный монтаж (приложение к журналу «Электроника. НТБ»). 2011. № 3. С. 140–145.
6. Можаров В.А., Шуман К.В. Адаптация техпроцесса подготовки производства печатных плат высокого класса точности под заданные параметры геометрической стабильности базового материала // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. № 50. С. 13. URL: <http://www.mai.ru/science/trudv/published.php> (дата обращения 20.03.2013)
7. Медведев А.М., Можаров В.А., Мылов Г.В. Печатные платы. Современное состояние базовых материалов // Печатный монтаж (приложение к журналу «Электроника. НТБ»). 2011. № 5. С. 148–162.
8. Медведев А.М., Можаров В.А. Многослойные печатные платы. Способы улучшения размерной стабильности материалов слоев // Производство электроники. 2011. № 5. С. 30–34.
9. Можаров В.А. Математическая модель пространственного совмещения элементов межсоединений в многослойных структурах авионики // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 65. С. 10. URL: <http://www.mai.ru/science/trudv/published.php> (дата обращения 20.03.2013)
10. Максимов А.В., Можаров В.А. Контроль волнового сопротивления в многослойных печатных платах // Сборник докладов научно-технической конференции «Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов» г. Москва, Изд-во ОАО «Концерн «Моринформсистема-Агат», 2011, С. 151–157.
11. Можаров В.А. Методы повышения плотности межсоединений в многослойных печатных платах // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2012». 17–20 апреля 2012 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон». 2012. С. 108-109 (0,12 п.л.).
12. Можаров В.А., Медведев А.М. Методы выбора оптимальных технологических норм производства, оценки стоимости и расчета надежности печатных плат // 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012». 13–15 ноября 2012 года. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2012. С. 295-296.
13. Кириченко О.Н., Можаров В.А. Реализация системы автоматического визуального контроля операции сверления печатных плат многономенклатурного производства // 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012». 13–15 ноября 2012 года. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2012. С. 275-276.

Подписано в печать: 16.05.2013

Заказ № 8502 Тираж - 100 экз.

Печать трафаретная. Объем: 1 усл.п.л.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

www.autoreferat.ru