

Влияние конструктивных параметров на плоскую деформацию печатных плат

С. Ванцов, к. т. н.¹, О. Хомутская, к. т. н.², Е. Лийн³

УДК 621.3.049.75:658.5.012.14 | ВАК 2.2.2

В настоящее время общим местом является обсуждение актуальности исследований в области технологии изготовления различного рода печатных плат. Увеличение плотности монтажа и повышение класса точности печатных плат приводит к увеличению требований к точности позиционирования элементов печатной платы (ПП). Особенно важным это требование становится в производстве многослойных плат, в которых несовмещение слоев может привести к неисправимому производственному браку. Последнее связано не столько с погрешностями выполнения отдельных технологических операций, сколько с характеристическими свойствами материала диэлектрического основания слоев печатной платы.

Традиционным, наиболее часто используемым, материалом диэлектрического основания является стеклотекстолит, представляющий собой слоистую структуру из стеклоткани и различного вида смол, чаще всего эпоксидной смолы. Этим определяются и физико-механические характеристики таких материалов. Наиболее существенными из них являются анизотропия свойств по объему материала и зависимость твердости от температуры. Образно говоря, контактные площадки печатной платы в силу этих свойств расположены на льдинах во время ледохода, случайно перемещающихся под влиянием изменения температуры как окружающего воздуха, так и воды, в которой льдины находятся. Такое сравнение тем более наглядно, поскольку пластические материалы, используемые в диэлектрическом основании, по сути представляют собой жидкости с достаточно высокой температурой текучести. Взаиморасположение «льдин» и их форма в плоскости «поверхности воды» определяются связанностью отдельных участков поверхности печатной платы за счет структуры плетения стеклоткани и топологии печатного рисунка, а по объему – с температурным воздействием на толщину «льдины».

Из сказанного следует, что, с учетом первоначально фиксированного общего ледяного покрова поверхности,

величина перемещений участков печатной платы друг относительно друга зависит от:

- случайного сочетания факторов, удерживающих ледяной пласт от раскалывания;
- состояния среды, в которой происходит раскол участков льдин;
- внешних воздействий, влияющих на скорость их расползания.

Для печатных плат случайное сочетание факторов зависит от физико-механических свойств материала печатной платы.

Состояние среды зависит от параметров технологических операций, производимых с заготовками в процессе изготовления ПП.

Внешние воздействия в значительной мере определяются состоянием плоских поверхностей слоя печатной платы, а именно количеством меди на отдельных фрагментах поверхности слоя, которое зависит от топологии платы.

Изначально топология ПП задается конструктором исходя из целесообразности размещения дискретных элементов на плате и требований по построению эффективной системы передачи сигналов внутри реализуемой электрической схемы. Отсюда возникает задача предсказания изменения расположения отдельных участков печатной платы в ходе осуществления каждой технологической операции и компенсации этих изменений на этапе проектирования и конструирования печатной платы.

¹ МАИ (НИУ), доцент, van2851@mail.ru.

² МАИ (НИУ), доцент, khomutskayaov@gmail.com.

³ МАИ (НИУ), аспирант каф. 307, elijn@bk.ru.

На деформацию многослойной печатной платы в целом оказывают влияние следующие технологические операции:

1. Сверление базовых и переходных отверстий;
2. Травление слоев для получения рисунка печатной платы;
3. Прессование пакета слоев платы.

Влияние этих операций на величину плоской деформации печатной платы определяется следующими действиями:

1. Процесс сверления заключается в удалении части армирующего поверхностного слоя меди и части тела диэлектрического основания, что в целом ослабляет жесткость слоя платы и, отчасти, способствует появлению релаксирующих усилий за счет снижения степени внутренних напряжений материала основания.
2. Процесс травления имеет целью получение печатного рисунка и заключается в удалении значительной части армирующего слоя меди, что в еще большей степени приводит к явлениям снижения жесткости слоя и увеличению релаксирующих воздействий.
3. Процесс прессования слоев оказывает наибольшее влияние на деформацию слоя с уже ослабленной на предыдущих операциях жесткостью за счет внешних воздействий – силового и теплового. Последнее в наибольшей степени проявляется с учетом физико-механических свойств слоистых пластиков на базе термореактивных полимеров. На рис. 1 показан типичный вид изменения линейных размеров пластиков при тепловом воздействии с учетом возникающих в их материале фазовых переходов.

Визуально процесс плоской деформации слоя печатной платы можно показать, используя в качестве «маячков» величины смещения отдельных участков изменения положений центров сквозных отверстий на слое (рис. 2).

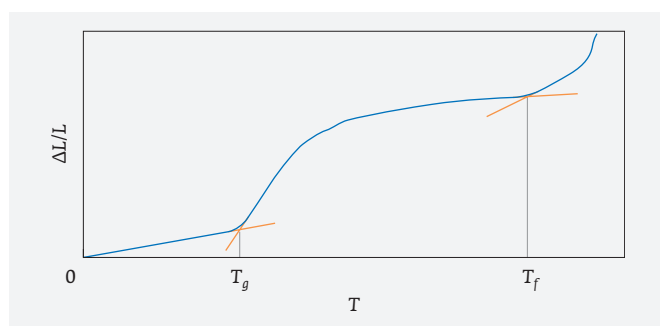


Рис. 1. Фазовые переходы при нагреве термореактивных полимеров. T_g – температура стеклования; T_f – температура разложения; $\Delta L/L$ – относительное изменение линейных размеров

Начальным полагается расположение центра отверстия до проведения каждой технологической операции, конечным – после ее проведения. Величина смещения рассчитывается как векторная сумма $L_{x_{ij}}$ и $L_{y_{ij}}$ для каждого отверстия.

Исходя из этой предпосылки, величину смещения центра произвольного исходного отверстия после проведения технологических операций можно рассчитать, используя следующую математическую модель [1]:

$$\begin{aligned} L'_{x_{ij}} &= K \cdot \left(L_{x_{ij}} + \sum_{k=0}^N \frac{L_{x_{k0}} + L_{x_{k1}} + \dots + L_{x_{kN}}}{N + |k - i|} \right), \\ L'_{y_{ij}} &= K \cdot \left(L_{y_{ij}} + \sum_{l=0}^N \frac{L_{y_{l0}} + L_{y_{l1}} + \dots + L_{y_{lN}}}{N + |l - j|} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где $L'_{x_{ij}}$ – уточненный вектор деформации в квадрате разбиения по оси абсцисс;

$L'_{y_{ij}}$ – уточненный вектор деформации в квадрате разбиения по оси ординат;

$L_{x_{ij}}$ – исходный вектор деформации в квадрате разбиения по оси абсцисс;

$L_{y_{ij}}$ – исходный вектор деформации в квадрате разбиения по оси ординат;

N – количество квадратов разбиения в строке;

i, j – индексы квадрата разбиения, деформация которого определяется;

l, k – индексы промежуточных квадратов разбиения, влияющих на деформацию квадрата с индексами i и j ;

K – поправочный коэффициент изменения деформации из-за топологии слоя и базового материала.

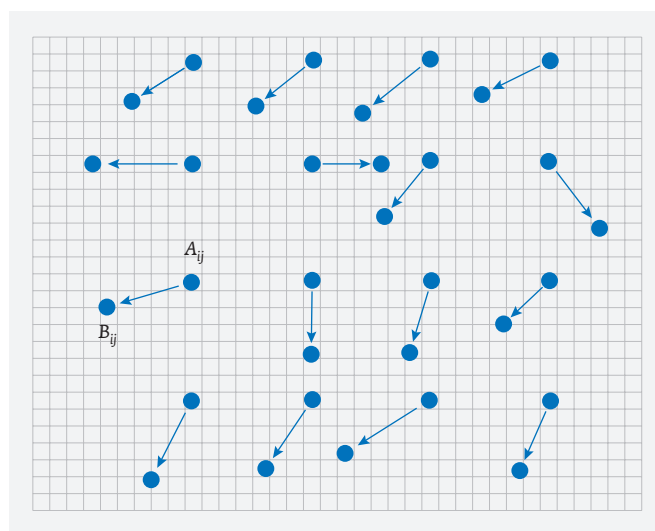


Рис. 2. Отображение направления смещения отверстий на печатной плате. A_{ij} – начальное положение отверстия; B_{ij} – конечное положение отверстия

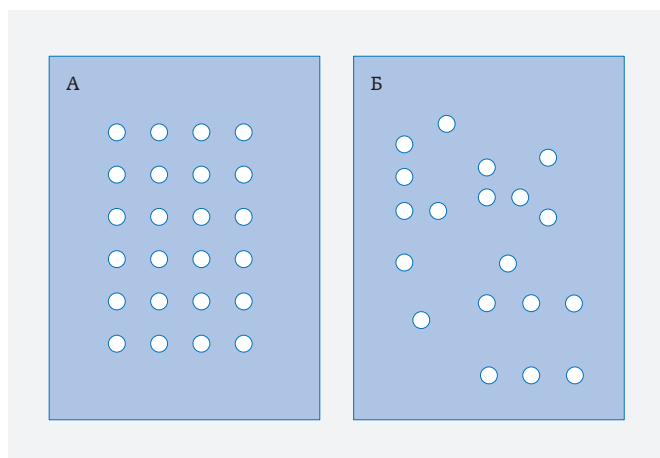


Рис. 3. Примерный вид фрагментов ПП:
а – исследуемого образца; б – реальной платы

Эффективность построенной модели была экспериментально подтверждена при условии регулярного расположения исходных отверстий на поверхности основания платы [2]. Модель позволяет рассчитывать математическое ожидание величины плоской деформации при осуществлении различных технологических операций.

Однако при произвольном количестве и расположении отверстий на слое существенное влияние на результаты расчета приобретает значение поправочного коэффициента K . Его значение определяется преимущественно количеством просверленных отверстий в расчетном квадрате разбиения модели. С увеличением количества отверстий уменьшается количество базового материала, что естественным образом ведет к уменьшению жесткости основания платы и создает предпосылку к увеличению степени деформации слоя при проведении технологических операций.

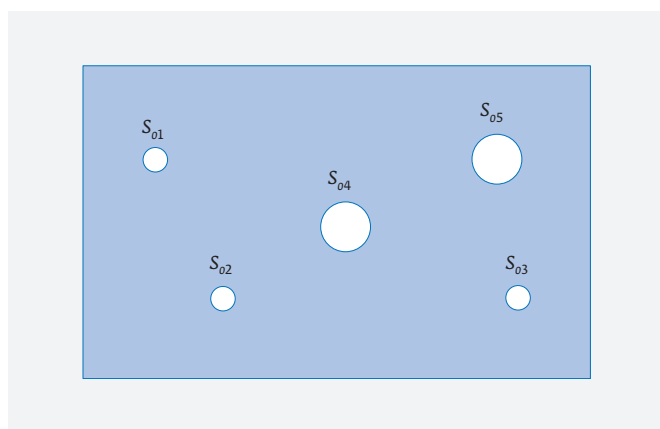


Рис. 4. Площади отверстий

В качестве параметров, характеризующих потенциал воздействия отверстий на деформацию на том или ином участке ПП, можно выделить:

- расстояние между отверстиями;
- диаметр отверстий.

Поскольку на реальных платах отверстия в основном располагаются не матрицей, возникает необходимость перехода к оценке деформации при случайном расположении отверстий (рис. 3).

В этом случае целесообразным является введение интегральной оценки, оказывающей влияние на величину весового коэффициента K в модели (1), учитывающей случайное расположение отверстий. В качестве такой оценки можно использовать удельную плотность сверления:

$$\rho_s = \frac{\sum_{i=1}^n S_{oi}}{S_{\text{пп}}}, \quad (2)$$

где S_{oi} – площадь i -го отверстия, n – количество отверстий, $S_{\text{пп}}$ – площадь рассматриваемого участка печатной платы (рис. 4).

Для учета такого конструктивного параметра платы, как толщина диэлектрического слоя, можно также воспользоваться удельной объемной плотностью сверления

$$\rho_v = \frac{\sum_{i=1}^n V_{oi}}{V_{\text{пп}}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{oi} \cdot h_{oi}}{S_{\text{пп}} \cdot h_{\text{пп}}}, \quad (3)$$

где V_{oi} – объем удаляемого материала при сверлении i -ого отверстия; n – количество отверстий на исследуемом участке слоя платы; $V_{\text{пп}}$ – объем материала на исследуемом участке; h_{oi} – глубина просверливаемого отверстия, в том числе и глухого; $h_{\text{пп}}$ – толщина слоя платы.

Введенные оценки удельной плотности сверления позволяют сделать заключение о том, что величина весового коэффициента K будет лежать в пределах от 0 до 1. При отсутствии отверстий в данном i -ом квадрате разбиения $K=0$ и деформации на этом участке отсутствуют, то есть $L_{i,j}=L_{i-1,j-1}$. В предельном случае, при отсутствии материала на данном участке разбиения $K=1$; такая ситуация может возникнуть в случае сложного внешнего контура границ слоя.

Предложенный подход позволяет экспериментально выявить зависимости деформации участков слоя печатной платы, а именно – зависимости математического ожидания от диаметра сквозного отверстия $M(D)$ от расстояния между сквозными отверстиями $M(l)$ и от толщины печатной платы $M(h)$, а также среднеквадратического отклонения от тех же величин: $\sigma(D)$, $\sigma(l)$ и $\sigma(h)$.

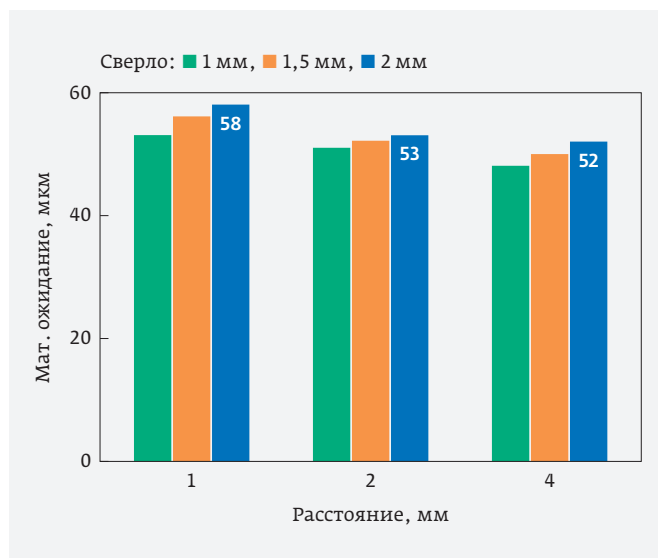


Рис. 5. Диаграмма результатов оценки деформации

Принцип выявления таких зависимостей базируется на анализе наложений двух изображений – анализируемого и эталонного. В качестве реперных точек для получения расчетных данных при определении величины деформации используются центры сквозных отверстий. Разница в смещении реперных точек на эталонном и анализируемом изображении позволяет определить в целом величину плоской деформации слоя, возникшей в результате осуществления определенной технологической операции.

Эксперимент включает в себя следующие этапы:

1. Получение изображения поверхности слоя до осуществления технологической операции.
2. Получение изображения поверхности слоя после осуществления технологической операции.
3. Определение центров отверстий на изображениях.
4. Приведение центров отверстий на сравниваемых изображениях к единой системе координат.
5. Расчет величин смещения центров отверстий.
6. Построение регрессионной модели деформации слоя.

Расчет величины смещения центров отверстий на эталонном и анализируемом изображениях производится по следующей формуле:

$$|\rho_i| = \sqrt{(x_{i_2} - x_{i_1})^2 + (y_{i_2} - y_{i_1})^2}, \quad (4)$$

где $|\rho_i|$ – величина в пикселях смещения центра i -го отверстия на анализируемом изображении по сравнению с эталонным; x_{i_1} , y_{i_1} – координаты центра i -го отверстия на эталонном изображении; x_{i_2} , y_{i_2} – координаты положения i -го отверстия на анализируемом изображении.

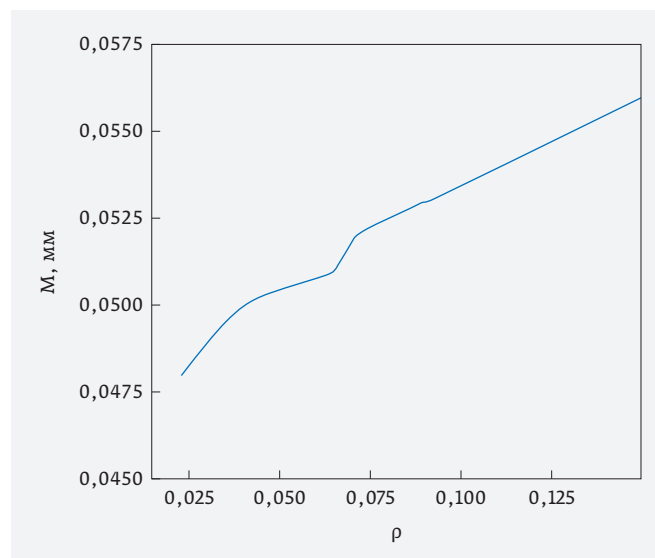


Рис. 6. График зависимости $M(\rho)$ от толщины образца

Результат расчета величины смещения сквозного отверстия переводится из пикселей в миллиметры по следующей формуле:

$$l_i = \frac{|\rho_i| \cdot 25,4}{DPI}, \quad (5)$$

где l_i – величина смещения центра i -го отверстия в мм; DPI (dots per inch) – разрешение изображения в точках на дюйм.

Эксперимент по оценке влияния технологической операции сверления отверстий в печатной плате был проведен на 180 заготовках с более чем 100 тысячами успешно распознанных на изображениях отверстий.

Результаты оценки математического ожидания величины деформации в зависимости от расположения отверстий и их диаметра приведены на рис. 5.

На основании этой диаграммы можно сделать выводы:

- при увеличении диаметра сверла математическое ожидание модуля длины вектора смещения отверстий увеличивается, плата деформируется сильнее;
- при увеличении расстояния между отверстиями математическое ожидание модуля длины вектора смещения отверстий уменьшается, плата деформируется меньше.

Экспериментально полученные значения СКО значений деформации представляют собой практически линейные ниспадающие зависимости от расстояния между центрами отверстий и возрастающие от диаметров отверстий.

В результате полнофакторного эксперимента была построена регрессионная модель зависимости величины

деформации диэлектрического основания от диаметров просверливаемых отверстий и расстояния между отверстиями на исследуемом квадрате разбиения поверхности.

$$M(l, D) = -0,0013l + 0,0056D - 0,0004lD + 0,0397. \quad (6)$$

Зачастую в квадрате разбиения имеются отверстия разного диаметра и с разными расстояниями между ними. В этом случае удобным является использование коэффициента удельной плотности сверления (2) и коэффициента удельной объемной плотности сверления (3).

Характерная зависимость математического ожидания деформации от толщины диэлектрического слоя представлена на рис. 6.

Полученные экспериментальные результаты качественно полностью совпадают с результатами расчета, что позволяет сделать заключение о правильности

построенной модели плоскостной деформации слоев печатной платы. Количественное расхождение не превышает 20%, что можно считать удовлетворительным на данном этапе уточнения коэффициентов модели с учетом случайных факторов.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-582.2022.4).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Никитин С., Поздняков К., Хомутская О.** Оценка деформации печатных плат // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 5. С. 144–150.
2. **Куликов Н., Хомутская О., Ванцов С.** Цифровой метод автоматизированной оценки деформации печатной платы // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 2. С. 186–191.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 2 600 руб.
за два тома

ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ СПРАВОЧНИК. В 2-х КНИГАХ

Под ред. К. Кумбза

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2022. – 2032 с.,
ISBN 978-5-94836-258-8
Т. 1. – 1016 с. Т. 2. – 1016 с.

В издании рассматриваются все процессы создания и применения печатных плат: проектирование и выбор базовых материалов, изготовление, обеспечение качества и оценки надежности печатных плат и печатных узлов, монтаж плат, включая особенности бессвинцовых технологий пайки, а также методы и средства испытаний применительно к специальным требованиям. Шестое издание дополнено информацией по ценообразованию, количественной оценке технологичности плат, управлению производством и решению экологических проблем.

Справочник рассчитан на широкий круг специалистов-технологов, конструкторов, схемотехников и специалистов по надежности, поскольку печатные платы являются фундаментом проектирования и производства изделий электроники.

Данная книга может служить учебным пособием для студентов и аспирантов вузов соответствующих специальностей.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphere.ru, sales@technosphere.ru



ВАШ ПАРТНЕР ПО КАЧЕСТВУ



КОМПЛЕКС ЭТТ FTT-17

Электротермотренировка
(ЭТТ) — гарантия качества
и надёжности электронной
продукции

Разработан в рамках Постановления
Правительства РФ №109 от 17.02.2016

Комплексы электротермотренировки серии FTT-17 предназначены для проведения испытаний ЭКБ по ОСТ 11 073.013-2008 в полностью автоматическом режиме с использованием следующих методов:

- Электротермотренировки (ОСТ 11 073.013–2008 метод 800–1)
- Испытаний на безотказность (ОСТ 11 073.013–2008 методы 700–1, 700–2.1, 700–2.2, 700–2.2.1, 700–2.3, 700–2.3.1)
- Воздействия повышенной температуры рабочей среды (ОСТ 11 073.013–2008 метод 204)



А Россия, 305000, г. Курск, ул. Володарского, 49 А
Т +7 (4712) 54-54-17 W sovtest-ate.com E info@sovtest-ate.com