

УДК 621.3.049.75

## **Математическая модель зависимости усадки стеклотекстолита от его конструкционных параметров**

**Можаров В. А.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*e-mail: v.a.mozharov@gmail.com*

### **Аннотация**

В статье представлена математическая модель зависимости поправки на усадку стеклотекстолита от таких параметров как толщина стеклоэпоксидного основания и толщина медной фольги. Показано применение данной математической на этапе технологической подготовки производства многослойных печатных плат.

**Ключевые слова:** геометрическая стабильность, базовый материал, печатная плата, фольгированный диэлектрик, технологическая подготовка производства

### **Введение**

Одно из главных требований, предъявляемых к авиационной и ракетно-космической технике – массогабаритные показатели аппаратуры. С целью удовлетворения этого требования многослойные печатные платы (МПП) постоянно усложняются, увеличивается плотность соединений. Это приводит к возникновению проблемы пространственного совмещения контактных площадок слоев под переходные отверстия. Рассовмещение, вызванное деформацией материала подложки и погрешностями технологического характера, вызывает снижение надежности МПП, что недопустимо в авиационной и другой аппаратуре ответственного назначения.

Одним из методов обеспечения совмещения элементов межсоединений является использование на этапе технологической подготовки компенсационного изменения размера фотошаблона слоя – ввода поправки на усадку. Этот метод особенно актуален, когда МПП состоит из слоёв с разной толщиной фольги или диэлектрического основания. Стеклотекстолит показывает различные значения усадки в зависимости от

конструктивных параметров[1], а использование поправки на усадку позволяет в итоге получать слои с идентичными геометрическими параметрами.

Поправка на усадку определяется путем проведения тестирования образца стеклотекстолита[2], отдельно для всего ассортимента толщин каждой марки материала. Для производства авионики, связанного с малыми тиражами и большой номенклатурой изделий, является весьма затратным этапом. Снизить себестоимость позволит применение математической модели, которая позволит вычислять значение поправки на усадку без проведения масштабного тестирования всего ассортимента используемых материалов.

### **Математическая модель зависимости усадки стеклотекстолита от его конструкционных параметров**

Значения поправки на усадки ( $c$ ) могут равняться любому вещественному числу в диапазоне от  $-0,003$  до  $0,003$  (если значения коэффициента усадки превышают по модулю  $0,003$ , то материал считается непригодным к использованию в прецизионных печатных платах). Толщина базового материала может находиться в диапазоне  $0,05 \div 3,00$  мм, а толщина медной фольги в диапазоне  $0 \div 210$  мкм [3]. Однако практика показывает, что для материалов с толщиной базового материала свыше  $0,5$  мм поправка на усадку имеет значение ниже  $0,0001$ , поэтому их можно исключить из рассмотрения, установив диапазон в  $0,05 \div 0,5$  мм.

Поправки на усадку для базового материала ISOLAIS680-333 ( $T_g=200^\circ\text{C}$ ), с толщиной медной фольги ( $t$ ) 18, 35,70 мкм и толщиной базового материала ( $h$ ) в 50, 75, 125, 150, 200, 250, 350, 500 мкм приведены в таблице [4]. Также известно, что этот материал имеет одинаковые показатели геометрической стабильности по направлению основы и по направлению утка стеклоткани[5].

Таблица 1. Поправки на усадку ( $c$ ) для различных толщин медной фольги и диэлектрического основания стеклотекстолита

		Толщина стеклоэпоксидного основания							
		0,05 мм	0,075 мм	0,125 мм	0,15 мм	0,2 мм	0,25 мм	0,35 мм	0,5 мм
Толщина медной фольги	18 мкм	0,0012	0,0009	0,0007	0,0006	0,0005	0,0004	0,0002	0,0001
	35 мкм	0,0009	0,0007	0,0005	0,0004	0,0003	0,0002	0,0001	-
	70 мкм	-	0,0004	0,0002	0,00015	0,0001	-	-	-

Физически коэффициент усадки равен математическому ожиданию усадки базового материала. Использование поправки на усадку связано с особенностями САМ-программы, где она применяется:

$$c = u - 1$$

где  $u$  – коэффициент усадки и  $c$  – поправка на усадку.

Как видно из таблицы, поправка на усадку зависит от двух переменных – толщины диэлектрика ( $h$ ) и толщины медной фольги ( $t$ ). Для первоначального представления о виде функции  $c = f(t, h)$  построим график поверхности по имеющимся точкам, используя сплайн-интерполяцию, в программе STATISTICA 6.1. На рисунке представлен результат выполнения этой операции.

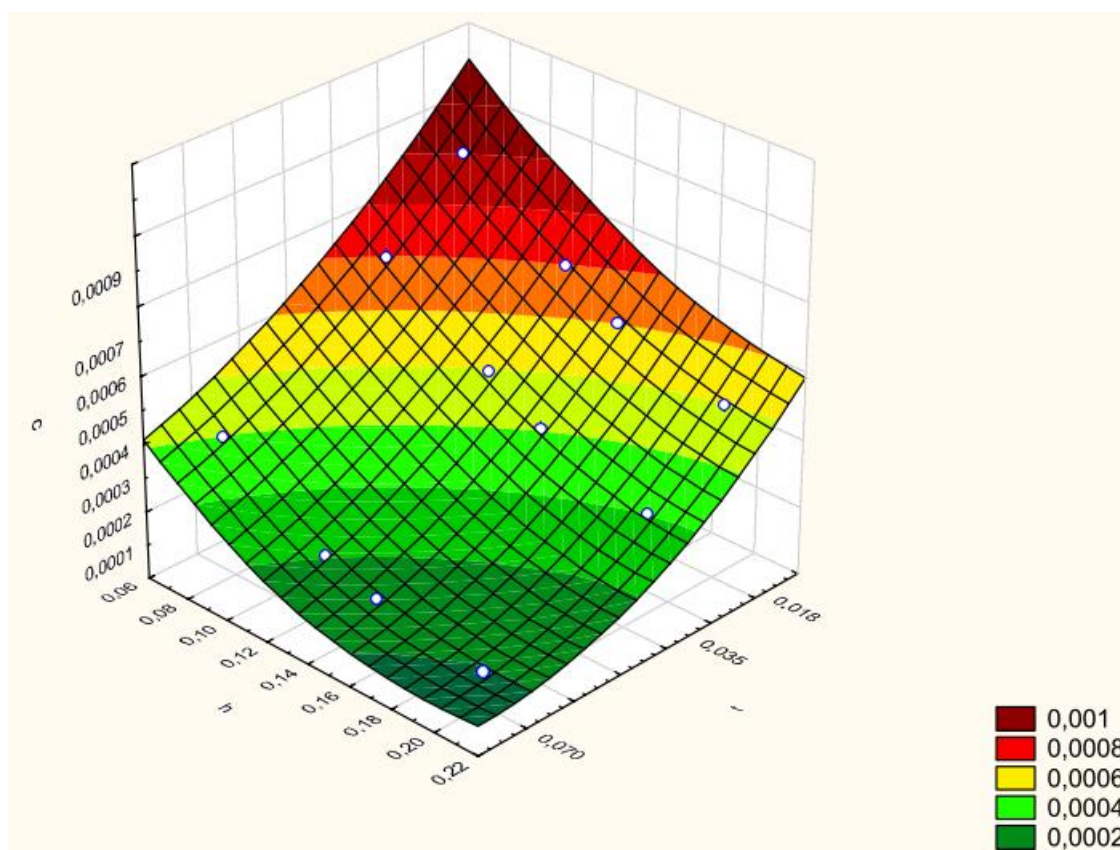


Рисунок1. Сплайн-интерполяция зависимости поправки на усадку по имеющимся точкам

Как видно из рисунка 1, зависимость  $c = f(t, h)$  нелинейная. Найдем аналитическую запись этой зависимости методом регрессионного анализа[6].

Найдем вид функции, которая наиболее точно описывается зависимость  $c = f(h)$  для каждого из трех значения толщины медной фольги.

Для трех значений  $t = \{18,35,70\}$ мкм на координатную сетку были нанесены точки в соответствии с таблицей 1 Таблица 1 (красные маркеры на рисунках). Наибольшую

корреляцию с экспериментальными данными для всех трех значений  $t$  показала регрессия функцией от экспоненты:

$$y(x) = k_0 \cdot e^{k_1 \cdot x}, \quad x \in [0,05; 0,5] \quad (1)$$

Для  $t = 18$  мкм  $k = \begin{bmatrix} 1,498 \cdot 10^{-3} \\ -5,749 \end{bmatrix}$ , а коэффициент детерминации  $R^2 = 0,993$ ,

стандартное отклонение  $\sigma = 5,12 \cdot 10^{-5}$  и критерий Стьюдента  $t = 1,86$  (рисунок 2).

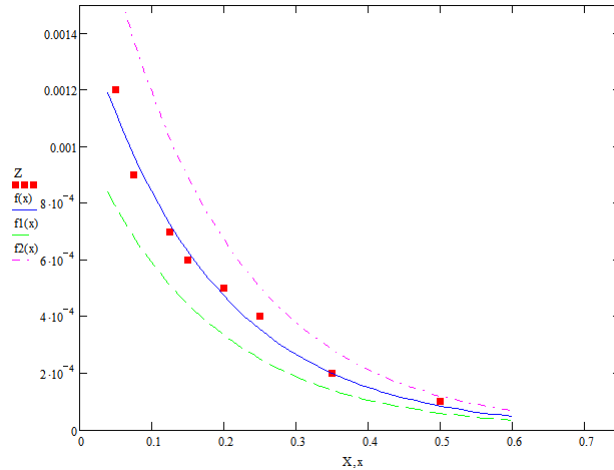


Рисунок 2. Нелинейная обобщенная регрессия  $[f(x)]$  данных  $[Z]$  с отображением доверительной вероятности 0,95  $[f_1(x), f_2(x)]$  для толщины медной фольги в 18 мкм

Для  $t = 35$  мкм  $k = \begin{bmatrix} 1,278 \cdot 10^{-3} \\ -7,514 \end{bmatrix}$ , а коэффициент детерминации  $R^2 = 0,990$ ,

стандартное отклонение  $\sigma = 3,86 \cdot 10^{-5}$  и критерий Стьюдента  $t = 1,86$  (рисунок 3).

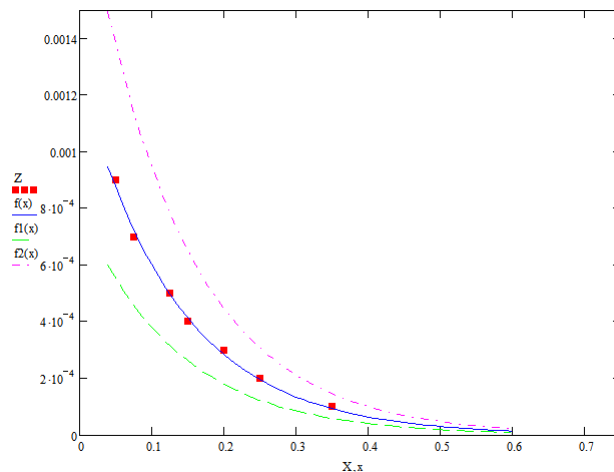


Рисунок 3. Нелинейная обобщенная регрессия  $[f(x)]$  данных  $[Z]$  с отображением доверительной вероятности 0,95  $[f_1(x), f_2(x)]$  для толщины медной фольги в 35 мкм

Для  $t = 70$  мкм  $k = \begin{bmatrix} 1,011 \cdot 10^{-3} \\ -12,511 \end{bmatrix}$ , а коэффициент детерминации  $R^2 = 0,979$ , стандартное отклонение  $\sigma = 1,94 \cdot 10^{-5}$  и критерий Стьюдента  $t = 2,132$  (рисунок 4).

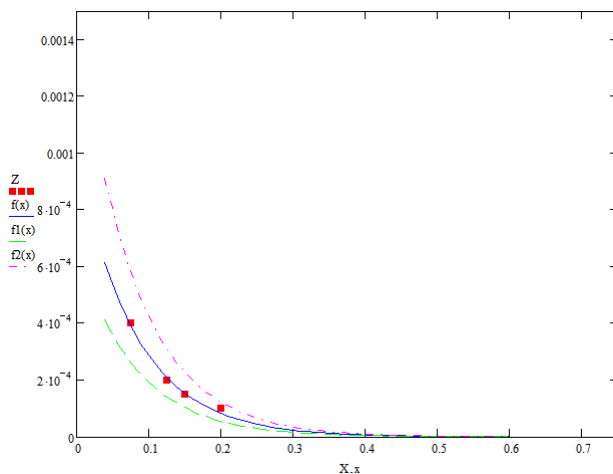


Рисунок 4. Нелинейная обобщенная регрессия  $[f(x)]$  данных  $[Z]$  с отображением доверительной вероятности  $0,95[f_1(x), f_2(x)]$  для толщины медной фольги в 70 мкм

Для выявления зависимости  $k_0$  и  $k_1$  от  $t$ , построим точки на координатной плоскости. Для определения формы, наиболее соответствующей экспериментальным данным, зависимостей  $k_0 = f(t)$  и  $k_1 = f(t)$ , проведем регрессионный анализ.

Для  $k_0$  была выбрана линейная регрессия, т.к. она обеспечивает достаточно высокую корреляцию с экспериментальными данными, и соответствует ожидаемой зависимости. Для  $k_1$  была выбрана регрессия функцией от экспоненты (1), как единственная форма зависимости, обеспечивающая малое стандартное отклонение.

Для  $k_0$  имеем функцию вида  $y(x) = m_0 + m_1 \cdot x$ , где  $m = \begin{pmatrix} 1,636 \cdot 10^{-3} \\ -9,106 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}$  а коэффициент детерминации  $R^2 = 0,98$ , стандартное отклонение  $\sigma = 3,44 \cdot 10^{-5}$  и критерий Стьюдента  $t = 2,353$  (рисунок 5).

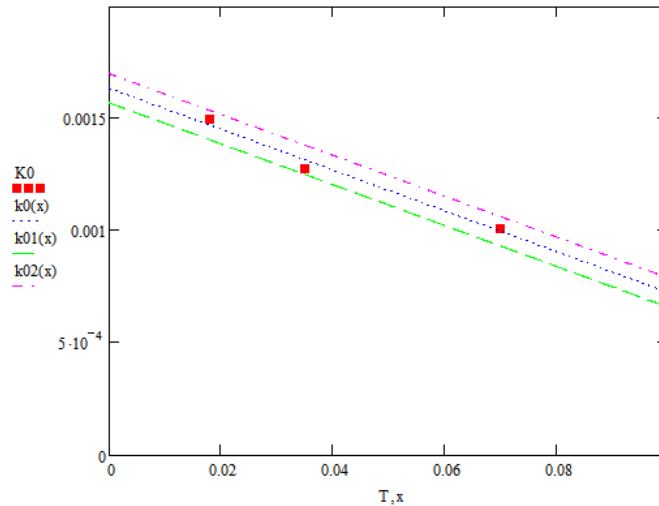


Рисунок 5. Линейная регрессия зависимости  $k_0$  от  $t$  с отображением доверительной вероятности 0,95[ $k_{01}(x)$  и  $k_{02}(x)$ ]

Для  $k_1$ имеем функцию вида  $y(x) = m_0 \cdot e^{m_1 \cdot x}$ , где  $m = \begin{pmatrix} -4,441 \\ 14,808 \end{pmatrix}$ , а коэффициент детерминации  $R^2 = 0,997$ , стандартное отклонение  $\sigma = 3,83 \cdot 10^{-2}$  и критерий Стьюдента  $t = 2,353$  (рисунок 6).

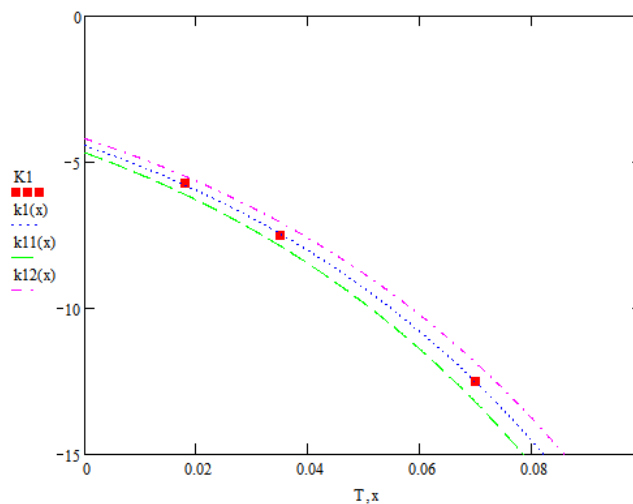


Рисунок 6. Нелинейная обобщенная регрессия зависимости  $k_1$  от  $t$  с отображением доверительной вероятности 0,95[ $k_{11}(x)$  и  $k_{12}(x)$ ]

Определив виды функциональных зависимостей можно записать общий вид зависимости поправки на усадку от толщин диэлектрика и медной фольги:

$$c(t, h) = (k_0 + k_1 \cdot t) \cdot e^{k_2 \cdot h} \cdot e^{k_3 \cdot t}, \quad h \in [0,05; 0,5], \quad t \in [0; 0,21] \quad (2)$$

А определив коэффициенты регрессии, можно записать частный случай зависимости для материала ISOLAIS680-333:

$$c(t, h) = (1,636 \cdot 10^{-3} - 9,106 \cdot 10^{-3} \cdot t) \cdot e^{-4,441 \cdot h} \cdot e^{14,808 \cdot t},$$

$$h \in [0,05; 0,5], \quad t \in [0,018; 0,21]$$

Из этого соотношения можно определить поправку на усадку для материала с любыми конструкционными параметрами из всей широкой номенклатуры марки ISOLAIS680-333.

Для наглядности зависимости  $c = f(t, h)$  для материала ISOLAIS680-333 построен график с наложением реально измеренных значений (рисунок 7).

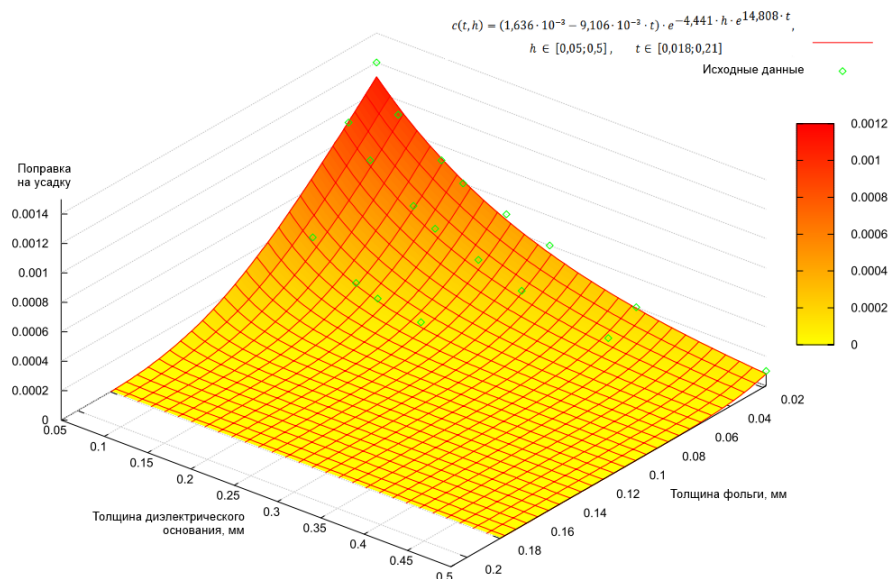


Рисунок 7. График функции  $c(t, h)$  для материала ISOLAIS680-333 с наложением исходных данных (зеленые точки)

Полученная зависимость позволяет, определив поправку на усадку для 6-10 различных типов базового материала одной марки, рассчитывать значения поправки для любого другого типа из всей номенклатуры базового материала. Это снижает общую стоимость МПП и время внедрения новых марок материала на производстве.

## Выводы

В результате анализа данных о поправке на усадку для стеклотекстолита ISOLAIS680-333 была предложена математическая модель зависимости коэффициента усадки от толщин медной фольги и диэлектрического основания, которая позволяет прогнозировать значение поправки на усадку для всей номенклатуры используемого базового материала по данным измерения нескольких образцов.

## Библиографический список

1. Иевлев В.И. Анализ точности производства электронных средств : учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2010. С. 103.
2. Медведев А.М., Можаров В.А. Многослойные печатные платы. Способы улучшения размерной стабильности материалов слоев // Производство электроники. 2011. № 5. С. 30–34.
3. Стеклотекстолит FR-4 | Полимеринвест-Юг [Online]. URL: <http://www.ugpromteh.ru/prod/fr4/fr.htm> (accessed: 19.02.2013).
4. Isola Group | IS680-333 [Online]. URL: <http://www.isola-group.com/products/is680-3-00/> (accessed: 10.01.2013).
5. ISOLA IS680-333 Specifications [Online]. USA, 2012. P. 2. URL: <http://www.isola-group.com/products/is680-333/> (accessed: 07.03.2013).
6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Москва: Высшая школа, 2000. С. 480.