

Оценка температурного профиля паяльника при монтажной пайке

Для того чтобы обеспечить высокую воспроизводимость качества паяных соединений и минимальные значения интенсивности отказов электронных модулей, необходимо управлять температурными параметрами паяльных инструментов. Авторы статьи получили математические выражения, связывающие температуру жала паяльника с его геометрическими параметрами и свойствами материала. Эти формулы можно использовать для определения оптимальных режимов процесса монтажной пайки.

Владимир Ланин,
профессор

vlanin@bsuir.by

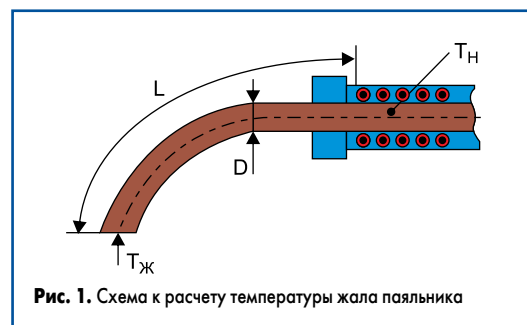
Тимофей Лавор

Для формирования монтажных соединений в мелкосерийном многономенклатурном производстве применяют различные конструкции паяльников и паяльных станций. В паяльнике перенос тепла осуществляется за счет теплопроводности жала, которое служит аккумулятором тепла, выделяемого нагревателем. В установившемся режиме количество тепла, накопленное в медном стержне, зависит от мощности нагревателя. Паяльные жала характеризуются определенными геометрическими параметрами: длиной, диаметром, формой загиба жала и заточки рабочего конца. Длина жала зависит от пространственного расположения соединений и может быть от 10 до 300 мм. Диаметр жала должен в 5–15 раз превышать диаметр паяемых проводников [1].

Требуемый температурный режим при индивидуальной пайке обеспечивается теплофизическими характеристиками паяльника. К ним относятся:

- Температура рабочего конца жала.
- Степень стабильности этой температуры, обусловленная динамикой теплового баланса между теплопоглощением паяемых деталей, теплопроводностью нагревателя и теплосодержанием паяльного жала.
- Мощность нагревателя и термический КПД паяльника, которые определяют интенсивность теплового потока в паяемые детали.

Обычно температура на жале паяльника задается в пределах +280...300 °С, а время пайки составляет не более 3 с [2].



В паяльнике перенос тепла осуществляется за счет теплопроводности жала, которое служит аккумулятором тепла, выделяемого нагревателем, расположенным на стержне. Взаимосвязь температуры жала длиной L в рабочей зоне $T_{ж}$ и зоне нагрева $T_{н}$ (рис. 1) в первом приближении выражена отношением [3]:

$$T_{ж} = T_{н} / \text{ch}(\beta L). \quad (1)$$

Обобщенный параметр β равен:

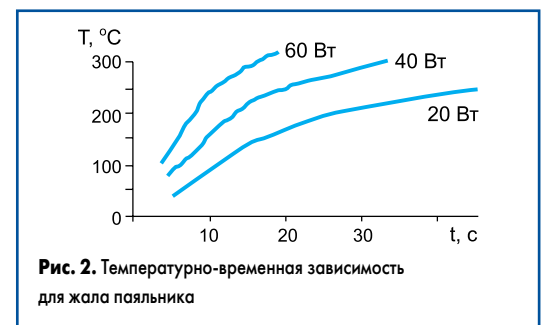
$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha P}{\lambda S}} = \sqrt{\frac{4\alpha}{\lambda D}}, \quad (2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи поверхности; P — периметр жала; λ — коэффициент теплопроводности; S — площадь поперечного сечения; D — диаметр.

Расчеты по формуле (1) для медного стержня паяльника диаметром 6 мм дают значение $\beta = 3,12$, тогда $T_{ж} = T_{н}/1,2$. В установившемся режиме количество тепла, накопленное в медном стержне, зависит от мощности нагревателя, и изменение температуры может быть определено по формуле [4]:

$$\Delta T = I^2 R t / cm, \quad (3)$$

где c — удельная теплоемкость меди; m — масса стержня, I — величина тока; R — электрическое сопротивление обмотки.



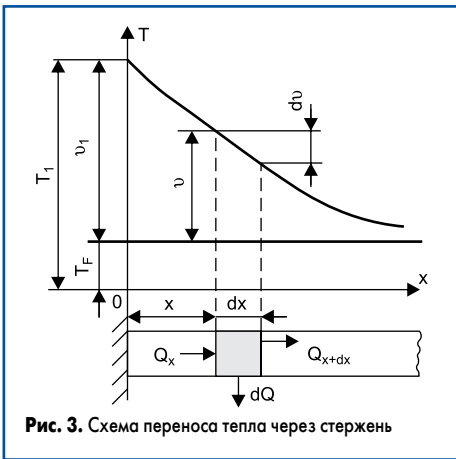


Рис. 3. Схема переноса тепла через стержень

Расчетные значения зависимости по формуле (3) (рис. 2) согласуются с экспериментальными данными в режиме теплового баланса. Для более точных расчетов необходимо учитывать потери тепла на теплоотдачу к защитному кожуху и на излучение от поверхности стержня.

Проблема обеспечения заданного температурного профиля жала паяльника связана с решением сложной трехмерной задачи нестационарного теплообмена с окружающей средой и паяемыми соединениями различной конструкции и массы [5]. С появлением поверхностью монтируемых электронных компонентов при прогрессирующей плотности монтажа паяных соединений в электронных модулях решение этой проблемы приобретает особую актуальность. В современных цифровых паяльных станциях температура паяльного стержня поддерживается с точностью $\pm(1-2)^\circ\text{C}$ в зоне расположения термодатчика, а в рабочей плоскости жала она может отличаться на 10–20%.

Для расчета температуры жала паяльника необходимо решить задачу теплообмена между его поверхностью периметром P и средой (закон Ньютона-Рихмана) и задачу теплопроводности (закон Фурье) жала конечной длины с площадью поперечного сечения S . Стержень находится в среде с постоянной температурой T_{cp} , поэтому предположим, что коэффициент теплоотдачи от поверхности стержня к окружающей среде постоянен для всей поверхности. Полагаем также, что площадь поперечного сечения мала по сравнению с его длиной. Это дает основание пренебречь изменением температуры в поперечном сечении и считать, что она изменяется только вдоль оси стержня.

Отсчет температуры будем вести от $T_{cp} = \text{const}$, поэтому избыточная температура стержня:

$$T_{изб} = T - T_{cp}$$

где T — текущая температура стержня.

Если задана температура стержня в зоне нагревателя T_H , то избыточная температура стержня будет:

$$T_{изб\max} = T_H - T_{cp}$$

На расстоянии x от основания стержня выделим элемент стержня длиной dx (рис. 3).

Уравнение теплового баланса для рассматриваемого элемента согласно закону Ньютона-Рихмана имеет вид:

$$Q_x - Q_{x+dx} = dQ, \quad (4)$$

где Q_x — количество тепла, входящее в левую грань элемента за единицу времени; Q_{x+dx} — количество тепла, которое выходит из противоположной грани элемента за то же время; dQ — количество тепла, отдаваемое за единицу времени наружной поверхностью элемента окружающей его среде.

Согласно закону Фурье:

$$Q_x = -\lambda S \frac{dT_{изб}}{dx},$$

$$Q_{x+dx} = -\lambda S \frac{dT_{изб}}{dx} - \lambda S \frac{d^2 T_{изб}}{dx^2} dx, \quad (5)$$

$$Q_x - Q_{x+dx} = \lambda S \frac{d^2 T_{изб}}{dx^2} dx, \quad (6)$$

$$dQ = \alpha_p T_{изб} P dx. \quad (7)$$

Приравнивая формулы (6) и (7), получаем дифференциальное уравнение, описывающее изменение температуры стержня:

$$\frac{d^2 T_{изб}}{dx^2} = \frac{\alpha_p P}{\lambda S} T_{изб}. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что для стержня заданной формы и размеров при условии постоянства коэффициентов α_p и λ в рассматриваемом интервале температур $\alpha_p P / \lambda S = \text{const} = \beta$. Тогда интеграл от уравнения (8) имеет вид:

$$T_{изб} = C_1 e^{\beta x} + C_2 e^{-\beta x}. \quad (9)$$

При $x = L$ имеет место равенство количества тепла, подведенного к торцу стержня за счет теплопроводности, количеству тепла, кото-

рое поверхность торца отдает в окружающую среду за счет теплоотдачи.

Для определения постоянных C_1 и C_2 в уравнении (9) используем граничные условия (10).

Подставляя полученные значения C_1 и C_2 в уравнение (9), получаем (11).

Умножив и разделив правую часть уравнения (11) на $e^{-\beta L}$ и произведя алгебраические преобразования, получим (12).

В предельном случае, когда $x = L$, формула (12) принимает вид:

$$T_{изб} = \frac{T_{изб\max}}{\text{ch}(\beta L) + \frac{\alpha_L}{\beta \lambda} \text{ch}(\beta L)}. \quad (13)$$

Тогда в применении к определению температуры жала паяльника полученная формула будет иметь вид:

$$T_{ж} = \frac{T_H - T_{cp}}{\text{ch}(\beta L) + \frac{\alpha_L}{\beta \lambda} \text{ch}(\beta L)} + T_{cp}. \quad (14)$$

Если пренебречь температурой окружающей среды и теплоотдачей с конца стержня, что можно допустить для случая, когда α_L на торце стержня мало, а коэффициент теплопроводности материала λ велик и отношение $\alpha_L / \lambda \rightarrow 0$, то для этих условий в соотношении (14) второй член знаменателя правой части обращается в ноль, и уравнение принимает вид формулы (1).

На основании полученных формул (1) и (14) построены графики зависимости температуры жала паяльника от его геометрических параметров: длины и диаметра (рис. 4). С уменьшением диаметра жала паяльника и увеличением его длины падение температуры в рабочей зоне более заметно, так как снижается теплосодержание жала.

Предложенное математическое выражение для температуры жала паяльника позволяет

$$\begin{cases} x = 0, T_{изб\max} = C_1 + C_2 \\ x = L, \left(\frac{dT_{изб}}{dx} \right)_{x=L} = C_1 \beta e^{\beta L} - C_2 \beta e^{-\beta L} = -\frac{\alpha_L}{\lambda} T_{избL} \text{ и } T_{избL} = C_1 \beta e^{\beta L} + C_2 \beta e^{-\beta L}. \end{cases} \quad (10)$$

$$C_1 = \frac{T_{изб\max} \left(\beta - \frac{\alpha_L}{\lambda} \right)}{e^{2\beta L} \left(\beta + \frac{\alpha_L}{\lambda} \right) + \left(\beta - \frac{\alpha_L}{\lambda} \right)}, \quad C_2 = \frac{e^{2\beta L} \left(\beta + \frac{\alpha_L}{\lambda} \right)}{e^{2\beta L} \left(\beta + \frac{\alpha_L}{\lambda} \right) + \left(\beta - \frac{\alpha_L}{\lambda} \right)}.$$

$$T_{изб} = T_{изб\max} \left[\frac{e^{\beta x} \left(\beta - \frac{\alpha_L}{\lambda} \right)}{e^{2\beta L} \left(\beta + \frac{\alpha_L}{\lambda} \right) + \left(\beta - \frac{\alpha_L}{\lambda} \right)} + \frac{e^{-\beta x} e^{2\beta L} \left(\beta + \frac{\alpha_L}{\lambda} \right)}{e^{2\beta L} \left(\beta + \frac{\alpha_L}{\lambda} \right) + \left(\beta - \frac{\alpha_L}{\lambda} \right)} \right]. \quad (11)$$

$$\begin{aligned} T_{изб} &= T_{изб\max} \left[\frac{\beta \left[e^{\beta(L-x)} + e^{-\beta(L-x)} \right] + \frac{\alpha_L}{\lambda} \left[e^{\beta(L-x)} - e^{-\beta(L-x)} \right]}{\beta \left[e^{\beta L} + e^{-\beta L} \right] + \frac{\alpha_L}{\lambda} \left[e^{\beta L} + e^{-\beta L} \right]} \right] = \\ &= T_{изб\max} \left[\frac{\text{ch}[\beta(L-x)] + \frac{\alpha_L}{\beta \lambda} \text{ch}[\beta(L-x)]}{\text{ch}(\beta L) + \frac{\alpha_L}{\beta \lambda} \text{ch}(\beta L)} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

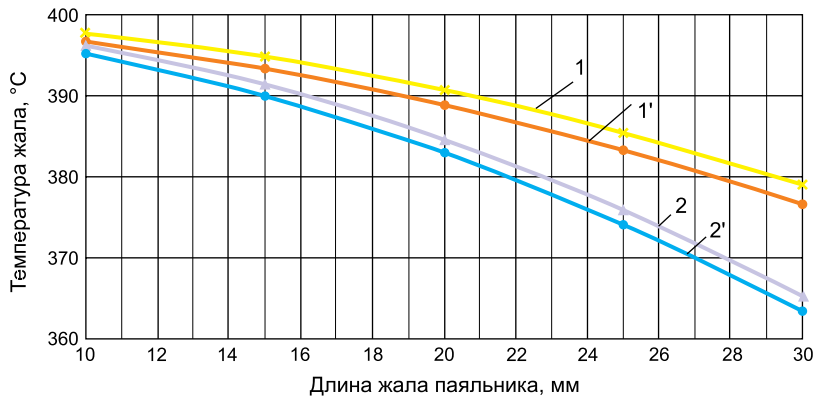


Рис. 4. Зависимость температуры жала паяльника от его длины:

1 — для диаметра 5 мм; 2 — для диаметра 3 мм; 1', 2' — рассчитанные по формуле (1)

получить более точные численные значения при его практическом применении, что особенно важно при пайке миниатюрных SMD-компонентов. При сравнении результатов расчетов для жала диаметром 5 мм с длиной 20 мм формула (14) дает более точный результат — на 5%.

Литература

1. Кривошей А. В., Бельцев А. Н. Пайка и сварка в производстве радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1974.
2. Максимихин Б. А. Технологические процессы пайки электромонтажных соединений. Л.: Энергия, 1980.
3. Гржимальский Л. Л., Ильевский И. И. Технология и оборудование пайки. М.: Машиностроение, 1979.
4. Ланин В. Л. Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии при пайке в электронике // Электронная обработка материалов. 2002. № 2.
5. Штенников В. Разогрев и охлаждение паяльного инструмента при пайке // Компоненты и технологии. 2004. № 8.