

Результаты теплофизических исследований в области контактной пайки электронных приборов

В. Н. ШТЕННИКОВ, Б. Т. БУДАИ

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия, e-mail: Shtennikov_vn@mail.ru

Показано, что одним из важнейших параметров пайки, влияющих на качество монтажных соединений, является ее температура. Используемый в настоящее время контроль температуры паяльных станций до пайки не гарантирует обеспечение требуемой температуры. Применение приведенных соотношений позволяет исключить указанный недостаток.

Ключевые слова: пайка, контроль качества, теплопередача.

It is shown that the temperature is one of the most important parameters of soldering affecting the quality of field connections. The current temperature control of soldering stations before soldering does not guarantee the assurance of required temperature. The application of relationships listed in article allows to exclude the mentioned shortcoming.

Key words: soldering, quality control, heat transfer.

Наряду с такими факторами как длительность пайки, зазор между деталями, состояние их поверхностей, используемый флюс и т. д. решающее влияние на качество пайки оказывает ее температура. Необходимо помнить, что уменьшение температуры и продолжительности пайки могут привести к плохой смачиваемости соединяемых поверхностей, а увеличение упомянутых параметров — к образованию относительно хрупкого интерметаллидного слоя Cu_6Sn_5 толщиной более 0,5 мкм и перегреву компонентов [1]. Поэтому, например, при использовании припоя ПОС61 температуру контактной пайки электронных приборов рекомендуется поддерживать в интервале 230—270 °С. Применение бессвинцовых припоев существенно сужает этот диапазон [2].

Несмотря на широкое освоение механизированных и автоматизированных методов пайки, ручной паяльный инструмент незаменим в опытном производстве, при ремонте, настройке и регулировке приборов. Контактная пайка, выполняемая при помощи нагретого инструмента или оборудования, незаменима при выполнении так называемого навесного (объемного) монтажа. Анализ литературы показывает, что в ней содержатся только самые общие сведения о влиянии параметров паяльного инструмента на температуру контактной пайки [3].

Для обеспечения требуемой температуры контактной пайки изделий электроники и электротехники контролируют температуру паяльного инструмента до начала работы [2]. Обычно температуру стержня паяльного инструмента увеличивают на 20—40 °С по отношению к требуемой температуре пайки, чтобы компенсировать отвод теплоты в паяное соединение. Этого бывает достаточно для выполнения большей части типовых соединений. Однако теплопоглощение нетипичных электромонтажных соединений может существенно отличаться от среднего, поэтому обеспечить качественную пайку в этом случае невозможно. Снижение температуры рабочего конца стержня во время контакта с паяным соединением может достигать нескольких десятков гра-

дусов и при этом температура пайки фактически не контролируется [3].

Для решения проблемы обеспечения оптимальной температуры пайки некоторые исследователи предлагают экспериментально подбирать тип паяльного инструмента, оптимальную температуру до пайки или сочетание того и другого [4]. Однако предлагаемые методы, во-первых, чрезвычайно трудоемки, а во-вторых, недостаточно объективны.

Таким образом, актуальность проблемы обусловлена влиянием качества паяных соединений на надежность электронных приборов в целом; большим количеством и разнообразием конструкций соединений в электронных приборах, требующих применения оригинального оборудования и различных технологий пайки; сложной зависимостью параметров технологического процесса пайки от параметров оборудования; наличием неточностей в технической литературе и нормативной документации по данному вопросу, включая международные стандарты IPC, МЭК; отсутствием научно обоснованных рекомендаций по соблюдению оптимальных режимов пайки, прогнозированию и решению проблем по их обеспечению.

Охлаждение длинного паяльного стержня при пайке. Сопоставление постоянных времени охлаждения паяльного стержня в воздухе и при контакте с паяным соединением показало, что пренебрежение теплообменом паяльного стержня с воздухом вносит погрешность не более 1 % при описании изменения температуры его конца во время контакта с паяным соединением, что в несколько раз меньше погрешности эксперимента.

Пусть рабочий конец стержня паяльного инструмента постоянного сечения при достаточно длительных перерывах между пайками имеет установившуюся температуру холостого хода $t_{x,x}$, а паяемый или обслуживаемый провод — температуру $t_2 = 0$. В момент времени $\tau = 0$ осуществляется тепловой контакт рабочего конца стержня с торцом провода. При этом стержень направлен в одну сторону оси ($x > 0$), а

провод — в другую ($x < 0$). Будем полагать, что провод и стержень теплоизолированы и неограниченны по длине, т. е.:

$$(\partial t / \partial x)_{x=\infty} = (\partial t / \partial x)_{x=-\infty} = 0; \quad t_{x=\infty} = t_1; \quad t_{x=-\infty} = t_2.$$

Если принять отсутствие теплообмена паяльного стержня и паяного соединения с воздухом и пренебречь градиентом температуры в поперечном сечении стержня и провода, то уравнения теплопроводности можно записать как

$$d^2 t_1 / dx^2 = dt_1 / (a_1 dt); \quad d^2 t_2 / dx^2 = dt_2 / (a_2 dt).$$

Температура соприкасающихся точек паяльного стержня и провода одинакова, тогда уравнение теплового баланса на границе контакта примет вид

$$-S_1 \lambda_1 dt_1 / dx|_{x=0} = -S_2 \lambda_2 dt_2 / dx|_{x=0}.$$

Решениями уравнений теплопроводности с приведенными начальными и граничными условиями при использовании данных из [5] будут:

$$\Delta t_1 = t_{n1} S_2 \sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2} / (S_1 \sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1}), \quad (1)$$

$$\Delta t_{1(x, \tau_n)} = \Delta t_1 \left\{ 1 - \Phi \left(\frac{x}{2 \sqrt{a_1 \tau_n}} \right) \right\}, \quad (2)$$

где $\Delta t_1 = t_{x,x} - t_{n1}$ — снижение температуры паяющего конца длинного стержня ($L \geq 1,6 \sqrt{a \tau_n}$) при одиночной пайке; L, a — длина и коэффициент температуропроводности стержня; τ_n — длительность пайки; τ_{n1} — избыточная температура рабочего конца стержня во время одиночной пайки; $S_1, \lambda_1, \rho_1, C_1$ — площадь поперечного сечения, коэффициент теплопроводности, плотность, удельная теплоемкость стержня паяльного инструмента; $S_2, \lambda_2, \rho_2, C_2$ — то же для паяного соединения; $\Phi(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-\xi^2} d\xi$ — интеграл вероятности.

Методика проведения измерений. Для определения корректности соотношений (1), (2) были проведены эксперименты с паяльными инструментами мощностью 6—1000 Вт, длиной паяльных стержней 50—100 мм, диаметром 2—4 мм при времени пайки 0,3—5 с. Температуру измеряли хромель-копелевой термопарой с проводами диаметром 0,2 мм. Для записи термо-ЭДС использовали потенциометр КСП-4 класса точности 0,25. Погрешность измерения температуры составляла ± 1 °С. Время пайки измеряли электронным секундомером-таймером СТЦ1 с погрешностью 0,02 с.

Качество паяных соединений, выполненных с учетом указанных соотношений, оценивали визуально при помощи микроскопа МБС-2

кратностью (25—50) $\times$; исследованиями форм и шлифов, механической прочности, в том числе на разрывной машине с ценой деления 0,5 Н; испытаниями на воздействие ударов поперек плоскости платы с различными режимами перегрузок.

Результаты экспериментов приведены на рис. 1, 2, где сплошными линиями показаны результаты расчета по (1), (2); точками — экспериментальные данные. Из соотношения (1) и рис. 1 следует, что снижение температуры Δt_1 рабочего конца стержня паяльного инструмента обратно пропорционально площади поперечного сечения стержня S_1 и коэффициенту теплопоглощения материала стержня $\sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1}$. На рис. 2

показаны зависимости отношения $\Delta t_{1(x, \tau_n)} / \Delta t_1$ снижения температуры стержня на паяющем конце от расстояния x и в разные моменты времени пайки τ_n . Снижение температуры по длине стержня во время контакта с паяным соединением, начиная с паяющего конца, можно описать уравнением (2). Совпадение в пределах погрешности эксперимента (около 6 %) экспериментальных данных с расчетными значениями подтвердило адекватность выбранной модели исследуемым процессам.

Выводы. Показано, что традиционный метод контроля температуры паяльного инструмента до начала пайки не обеспечивает оптимальную температуру пайки уникальных соединений. Метод достижения требуемой температуры пайки, основанный на подборе оптимального сочетания типа и температуры паяльного инструмента, малоэффективен. Усовершенствованный метод основан на установленной зависимости температуры пайки от теплофизических характеристик как самого соединения, так и используемого инструмента. Охлаждение рабочего конца паяльного инструмента при одиночной пайке не зависит от наличия в нем терморегулятора, мощности, длины стержня, если он достаточно длинный. Установлено влияние начальных температур стержня и соединения, диаметров стержня и провода, теплофизических параметров материала стержня и провода на температуру пайки.

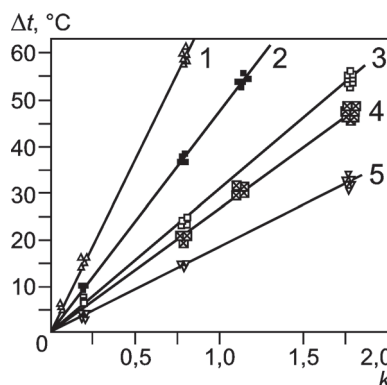


Рис. 1. Зависимости Δt_1 от $k = S_2 \sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2} / S_1 \sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1}$:

1, 3, 5 — медные стержни диаметрами 2, 3, 4 мм, соответственно; 2 — стержень из стали 15 диаметром 4 мм; 4 — стержень из алюминия АВ97 диаметром 4 мм

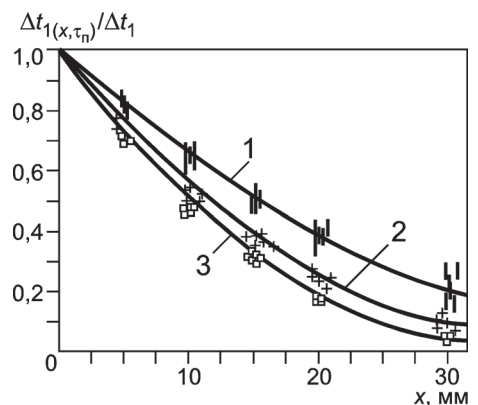


Рис. 2. Снижение температуры длинного рабочего стержня постоянного диаметра во время пайки на различном расстоянии от паяющего конца в разные моменты времени пайки $\tau_n = 2,7; 1,4; 1,0$ с, соответственно кривые 1—3

Высокое качество паяных соединений, выполненных с учетом полученных соотношений, подтверждено проведенными испытаниями блоков автоматики на устойчивость к воздействию механических нагрузок, на надежность, проверкой механической прочности нескольких сотен паяных соединений, визуальным контролем нескольких десятков тысяч соединений, исследованием их шлифов и форм, изучением внешнего вида разрушенных паяных соединений.

Полученные соотношения можно использовать для проводного и печатного монтажа электронных приборов любого назначения. Использование данной методики позволяет прогнозировать и полностью исключать дефекты паяных соединений, вызванных несоблюдением температурных режимов пайки.

Л и т е р а т у р а

1. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Контактные металлургические процессы при пайке. М.: Металлургия, 1977.
2. Манко Г. Пайка и припой. М.: Машиностроение, 1968.
3. Максимихин Б. А. Технологические процессы пайки электромонтажных соединений. Л.: Энергия, 1980.
4. Хряпин В. Е. Справочник паяльщика. М.: Машиностроение, 1981.
5. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976.

Дата принятия 13.10.2013 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.3.018.12

Инструментальная погрешность определения фазового угла между сигналами низкой частоты с накоплением и GPS-синхронизацией

О. Л. СОКОЛ-КУТЫЛОВСКИЙ, А. И. САРВАТИНОВ

Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия, e-mail: s-k52@mail.ru

Исследована погрешность определения фазового угла между двумя периодическими сигналами низкой частоты с накоплением сигналов, синхронизированных GPS-приемниками. Показано, что при программной обработке случайная погрешность определения фазового угла составляет 0,01°.

Ключевые слова: фазовый угол, низкая частота, взаимодействие электромагнитного поля с веществом.

The error of determination of phase angle between two periodic low frequency signals with accumulation of signals synchronized by GPS receivers has been studied. It is shown that at program processing the casual error of determination of phase corner can be 0,01°.

Key words: phase angle, low frequency, interaction of electromagnetic field with substance.

Для выявления электромагнитных аномалий в геофизике применяют амплитудно-фазовые методы измерений вторичного электромагнитного (ЭМ) поля, несущего информацию об электромагнитных свойствах горных пород. В настоящее время широко используют методы, в которых информативным параметром является амплитуда вторичного ЭМ-поля. Фазовые же методы при этом носят вспомогательный характер и, как правило, служат для синхронного детектирования слабых сигналов ЭМ-поля. Фазовый сдвиг сигналов как информативный параметр в геофизике практически не применяют, так как имеющаяся аппаратура не обеспечивает достаточно высокую точность измерений фазового угла; кроме того, метод сложен в реализации и не имеет разработанных методик выявления и интерпретации вторичных источников ЭМ-поля. Тем не менее, метод поиска электромагнитных аномалий по измерению фазового сдвига в низкочастотной индукционной электроразведке представляет определенный интерес, так как в нем не требуется воссоздание топологии первичного ЭМ-поля источника возбуждения, что в полевых условиях трудновыполнимо.

Методика определения фазового угла между периодическими сигналами низкой частоты. Для повышения точ-

ности измерений фазового угла были разработаны компьютерные программы обработки периодических сигналов низкой частоты с визуализацией результатов измерений. Однако данных о фазовых характеристиках и относительном времени задержки сигналов в каналах измерения аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в технической документации нет. Чтобы эффективно использовать разработанный метод с прямым измерением фазового сдвига [1], необходимо оценить погрешность элементов комплекса аппаратуры. Исследовали случайную и систематическую инструментальные погрешности определения фазового угла двух синхронных периодических сигналов низкой частоты при различных времени дискретизации АЦП, частотах и числе периодов накапливаемого сигнала.

На рис. 1 показана структурная схема измерительного комплекса. Сигнал измерительного канала поступает на один из входов АЦП 6 с магнитомодуляционного преобразователя 5, расположенного внутри токовой петли 4. Ток возбуждения подается в петлю от генератора тока 3, которым управляет преобразованный в меандр импульсный сигнал частотой 1 Гц, поступающий от GPS-приемника 2.