

ИНДУКЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ МОНТАЖНОЙ ПАЙКИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

В.Л. Ланин, И.И. Сергачев

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь, vlanin@bsuir.by*

Индукционные устройства на магнитопроводе способны с высокой точностью поддерживать температуру нагрева деталей при высокой теплоотдаче в процессе монтажной пайки. Максимальная скорость нагрева при оптимальных параметрах процесса достигает $80^{\circ}\text{C}/\text{с}$, что позволяет реализовать бесконтактный нагрев небольших по размеру деталей в зазоре магнитопровода индуктора.

УДК 621.396.6

ВВЕДЕНИЕ

Индукционный метод нагрева проводников переменным электромагнитным полем давно и успешно применяется в промышленности. Воздействие энергии высокочастотных (ВЧ) электромагнитных колебаний позволяет осуществлять высокопроизводительный бесконтактный нагрев в различных процессах: термообработке, плавке, упрочнении, сварке, пайке, выращивании кристаллов и т.д. Наиболее важными преимуществами ВЧ нагрева являются следующие:

- энергия нагрева создается вихревыми токами непосредственно в материале изделия,
- возможны высокая плотность энергии и короткое время нагрева,
- локализация нагрева в пределах обрабатываемой зоны,
- нагрев в любой среде, включая вакуум или инертный газ,
- высокая экологическая чистота нагрева,
- использование электродинамических сил для улучшения растекания припоя, перемешивания расплава металла и т.д.

Однако использовать индукционный нагрев в паяльных устройствах для монтажной пайки стали сравнительно недавно. Индукционный нагрев с помощью специализированной оснастки – индукторов – в диапазоне высоких частот (до 2000 кГц) при отношении глубины проникновения к толщине детали $\delta/h < 0,5-1,0$ требует значительных удельных мощностей (до 10^6 Вт/м²) [1]. Такой нагрев применяют для конструкционной пайки волноводных трактов, металлбумажных конденсаторов, коммутационных элементов, твердосплавного инструмента и т.д. Индукторы соленоидального типа характеризуются значительным рассеянием магнитного потока, низким КПД и необходимостью электрической и тепловой изоляции от нагреваемых поверхностей деталей. Источники высокочастотной энергии – ламповые генераторы – имеют значительные массогабаритные характеристики и требуют принудительного водяного охлаждения.

С переходом на бессвинцовую технологию ключевым требованием к паяльному оборудованию становится стабильность термоуправления, то есть сохранение точности поддержания температуры в течение всего процесса пайки электронных компонентов. Связано это требование с тем, что температура пайки повысилась на 40 градусов и стала близка к предельно допустимой для компонентов температуре. Снижение точности термического профиля нагрева увеличивает риск теплового повреждения компонентов. Традиционные индукционные системы достаточно инерционны, в них затруднено применение в качестве датчика термпары, подверженной электромагнитным наводкам.

Прогресс в области индукционного нагрева при монтажной пайке достигнут за счет новых конструкций индуктирующих устройств и применения мощных полевых транзисторов в ВЧ источниках питания. Нагрев переменным электромагнитным полем в зазоре магнитопровода индукционного устройства с открытой магнитной цепью обеспечивает высокую скорость при небольших удельных мощностях, однако сильно зависит от материала детали и геометрических факторов [2].

Воздействие энергии электромагнитного поля позволяет осуществить не только высокопроизводительный бесконтактный нагрев деталей с помощью наведенных в них вихревых токов ВЧ, но и активировать припой за счет вихревых токов и пондеромоторных сил, и улучшить его растекание по паяемым поверхностям. Качество паяемых соединений в процессах ВЧ пайки зависит от следующих факторов: конструкции индуктора и магнитопровода, скорости нагрева деталей и припоя, избирательности и локальности ВЧ нагрева, равномерности и регулируемости нагрева во времени и по сечению паяемых деталей [3].

Предложена конструкция и исследованы параметры индуктирующего устройства на магнитопроводе, в котором нагрев проводящих материалов осуществляется в зазоре магнитопровода.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В индукционной нагревательной системе изменяющийся во времени магнитный поток Φ , который создается индуктором, проходит через проводящее тело и индуцирует напряжение и вихревые токи в нем, как в короткозамкнутой обмотке трансформатора (рис. 1,а). Расчет выделяемой в изделии мощности при индукционном нагреве достаточно сложен, однако для большинства практических применений эту мощность можно определить из следующего выражения [4]:

$$P = H^2 \cdot S \cdot K / \delta, \quad (1)$$

где H – напряженность магнитного поля; S – площадь поверхности в нагретой зоне; K – фактор передачи, зависящий от формы и размеров тела; δ – глубина проникновения поля.

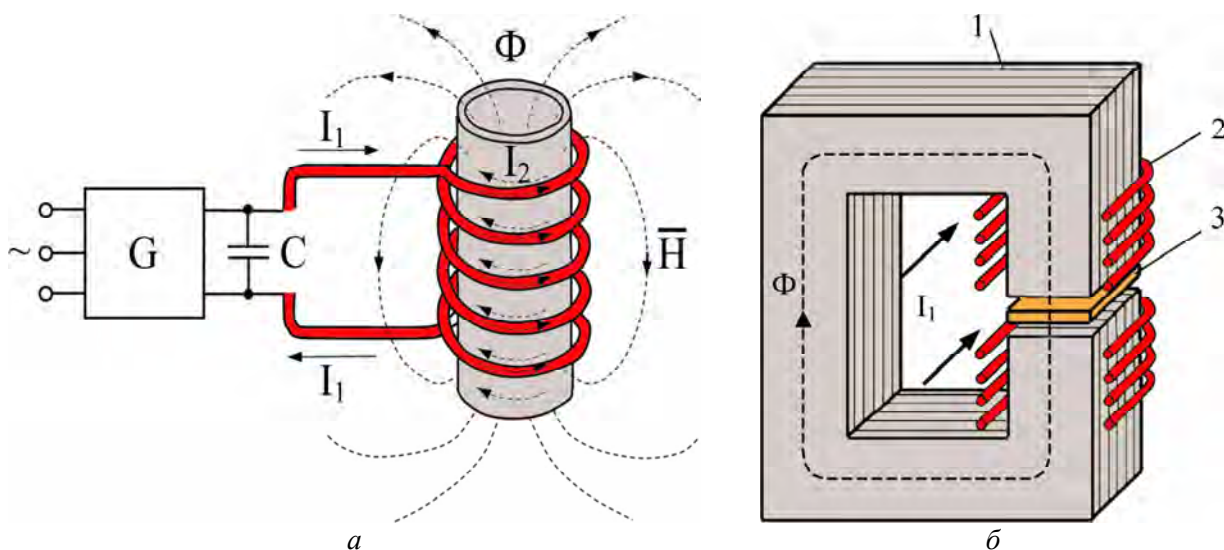


Рис. 1. Схемы нагрева индуктором соленоидального типа (а) и в зазоре магнитопровода (б): 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – деталь

Поскольку глубина проникновения поля определяется как

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (2)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала, μ – его магнитная проницаемость, то увеличение магнитной проницаемости и частоты тока f приводит к более выраженному поверхностному эффекту, когда глубина проникновения составляет доли миллиметра.

Эффективная мощность ВЧ нагрева в общем случае равна

$$P_{y\delta} = \frac{U_{y\delta}^2 \cos\varphi \cdot \eta}{R_{\eta}}, \quad (3)$$

где $U_{y\delta}$ – эффективное напряжение на индукторе; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности; η – КПД нагрева; R_{η} – электрическое сопротивление токам ВЧ в зоне нагрева.

При нагреве переменным электромагнитным полем в зазоре магнитопровода (рис. 1,б) напряжение, наводимое в деталях, пропорционально индукции магнитного поля B , площади детали S_d и частоте тока, а мощность, выделяемая в зоне нагрева, равна [5]:

$$P_H = K \left(\frac{U_m}{W}\right)^2 \frac{h \cdot \cos\varphi}{\pi \cdot L_d \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f}}, \quad (4)$$

где K – коэффициент, зависящий от перекрытия зазора; W – число витков обмотки; U_m – амплитуда напряжения на обмотке; h – ширина зоны нагрева; L_d – периметр зоны нагрева.

Разработано индукционное устройство для формирования контактных соединений легкоплавкими припоями, содержащее магнитопровод с открытой магнитной цепью и обмотку. Индуктирующая обмотка подключалась к ВЧ генератору 1 (рис. 2). Параметры ВЧ напряжения контролировали вольтметром В7-73/1 и частотомером ЧЗ-67. Температуру в рабочей зоне измеряли с помощью термопары ХК, прикрепленной к детали 4, и цифрового измерителя температуры ТРМ 201. Напряженность магнитного поля в зазоре магнитопровода 2 оценивали по величине ЭДС в измерительной рамке 5 вольтметром 7 типа В7-73/1. Для изменения магнитной проницаемости сердечника в дополнительную обмотку подавали постоянный или переменный ток подмагничивания величиной 1–5 А от источника 3.

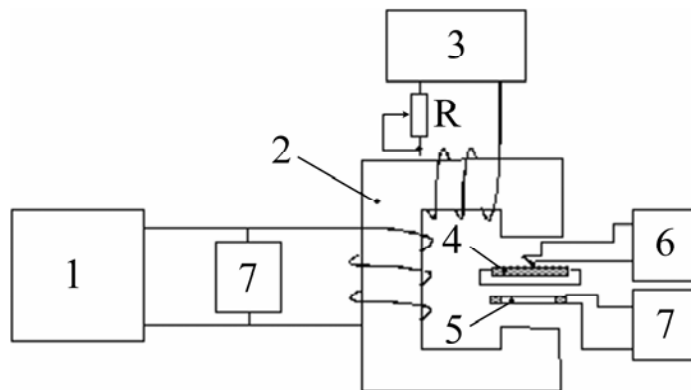


Рис. 2. Схема индукционного нагрева в зазоре магнитопровода: 1 – генератор; 2 – магнитопровод; 3 – источник тока; 4 – изделие; 5 – измерительная рамка; 6 – измеритель температуры; 7 – вольтметр

Величина напряженности магнитного поля рассчитывалась как

$$H = U_m / \mu (4,44 \cdot S \cdot f \cdot w), \quad (5)$$

где U_m – амплитуда напряжения на рамке; μ – абсолютная магнитная проницаемость; S – площадь рамки; w – число витков рамки.

Для активации растекания припоя при ВЧ нагреве в зазоре магнитопровода индуктора с момента расплавления припоя до завершения его растекания паяемому изделию сообщали НЧ вибрации путем подачи переменного тока подмагничивания частотой 50–400 Гц и амплитудой 1–10 А в обмотку подмагничивания. Амплитуда вибраций деталей пропорциональна величине тока подмагничивания, магнитной проницаемости материала, длине незакрепленной части детали и составляла 0,5–5,0 мм для тока подмагничивания 1–10 А. Направление вибраций паяемых деталей выбирали таким образом, чтобы они совпадали с направлением вектора средней скорости течения припоя в паяемый зазор, что было достигнуто соответствующей ориентацией изделия в магнитопроводе индуктора.

ВЧ нагрев в зазоре магнитопровода применялся для герметизации пайкой ИС в металлокерамическом корпусе типа 101МС14-1 с использованием припоя оловянно-свинцового ПОС-61 ГОСТ 21931-76 и флюса ФКСп. Для обезжиривания паяемых поверхностей служил спирт этиловый технический ГОСТ 2874-73.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ температурных зависимостей в зоне нагрева (рис. 3) показал, что магнитные материалы, такие как никелевые сплавы, нагреваются с большей скоростью, а затем в результате магнитных превращений скорость нагрева падает. Поэтому такая конструкция индукционного устройства рациональна для конструкционной пайки изделий небольших размеров из металлов и сплавов при полном перекрытии зазора магнитопровода.

Напряженность магнитного поля максимальна в центре зазора магнитопровода индукционного устройства и достигает $(15-25) \cdot 10^3$ А/м, однако за счет краевых эффектов за пределами зазора наблюдается суммирующее действие магнитного поля трехмерной структуры, что характерно и для круговых индукторов без магнитопровода [6].

Исследованы зависимости температуры нагрева объекта от коэффициента перекрытия зазора при амплитуде напряжения на индукторе 150 В и частоте электромагнитных колебаний 66 кГц (рис. 4).

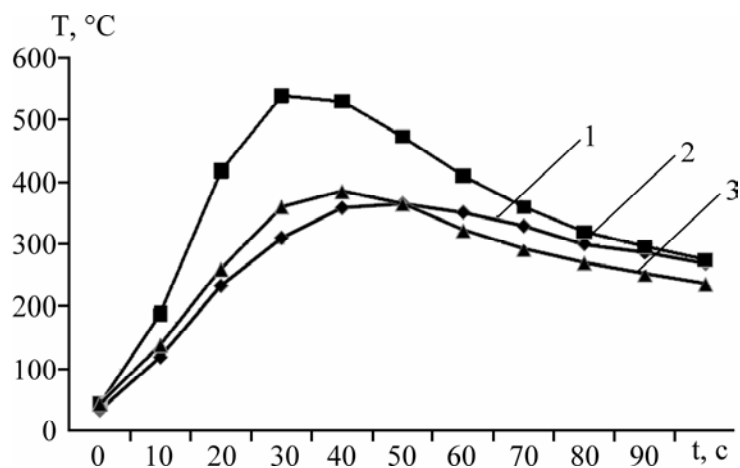


Рис. 3. Зависимости температуры нагрева для различных металлов: 1– сталь ($\mu = 40$); 2 – сплав 29Н18К ($\mu = 200$); 3– медь

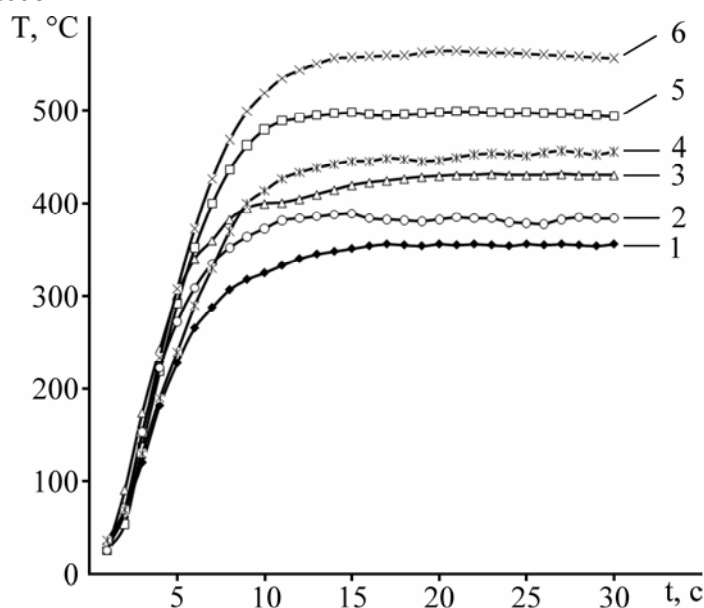


Рис. 4. Зависимости температуры в зоне нагрева от времени и коэффициента перекрытия зазора K_n : 1 – 0,5; 2 – 0,75; 3 – 1; 4 – 6; 5 – 2; 6 – 4

При коэффициенте перекрытия $K \leq 0,25$ нагрев неэффективен. Деталь нагревается в течение продолжительного времени (более 30 с), так как в ней индуцируется малая плотность вихревых токов и мощности нагрева не хватает на то, чтобы компенсировать потери тепла в окружающую среду. При $K > 4$ эффективность нагрева также снижается в связи с уменьшением зоны нагрева и передачи части тепла за счет теплопроводности. Оптимальными условиями работы являются $0,75 < K \leq 4$.

Скорость нагрева электромагнитным полем растет в зависимости от частоты, поскольку уменьшается глубина проникновения электромагнитного поля в проводящий материал и в большей степени выражен поверхностный эффект. Максимальная скорость нагрева при полной выходной мощности генератора достигает $80^{\circ}\text{C}/\text{с}$, что позволяет реализовать бесконтактный нагрев небольших по размеру деталей в зазоре магнитопровода индуктора.

Индукционное устройство применено для герметизации пайкой корпусов интегральных схем (ИС) с планарными выводами в корпусе типа 14, изготовленных из сплава 29Н19К с гальваническим покрытием сплавом олово-никель толщиной 6 мкм, с использованием припоя ПОС61 и спиртоканифольного флюса. Нагрев корпуса осуществлялся в зазоре магнитопровода сечением 200 мм^2 при напряжении на индуктирующей обмотке 300 В. Через 3 с нагрева припойная прокладка расплавлялась, и с этого момента в обмотку подавался ток подмагничивания частотой 50 Гц и амплитудой 5 А в течение 1–2 с. Вследствие вибрации крышки припой заполнял зазор в соединении и образовывал равномерные галтели по периметру паяного шва.

В другой конструкции индукционного устройства магнитный сердечник из феррита помещался внутри двухслойной индуктирующей обмотки, которая в свою очередь была охвачена кольцевым

магнитопроводом из феррита для концентрации магнитного потока. Скорость нагрева зависела от выходного напряжения источника ВЧ напряжения и частоты тока.

Индукционное устройство было применено для пайки контактов и разъемов при сборке силового электронного модуля (рис. 5). На места соединений наносилась припойная паста ПП-250. Пайка каждого контакта осуществлялась индивидуально в течение 8–10 с.

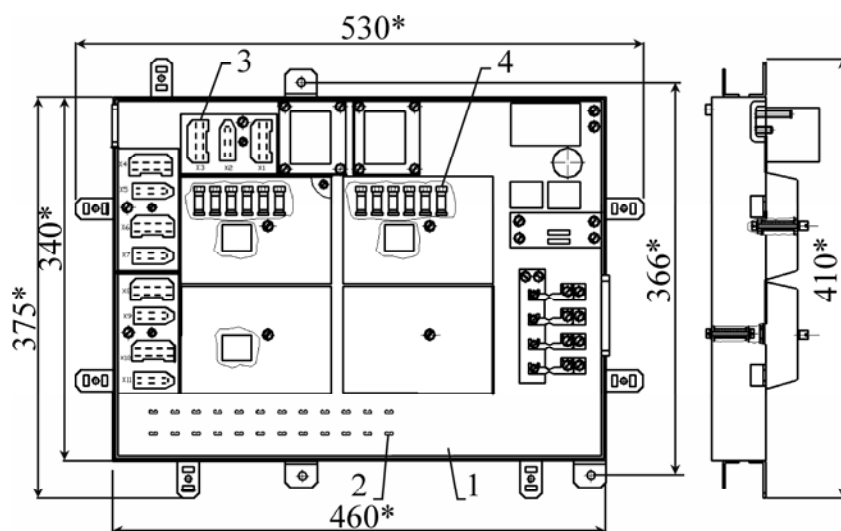


Рис. 5. Силовой электронный модуль: 1 – плата; 2 – контакт; 3 – вилка; 4 – предохранитель

ВЫВОДЫ

Для пайки малогабаритных и миниатюрных деталей эффективен нагрев ВЧ электромагнитными колебаниями, локализованный в зазоре магнитопровода. Индукционные устройства на магнитопроводе способны с более высокой точностью поддерживать температуру нагрева деталей при высокой теплоотдаче в процессе пайки. В этом случае интенсивность нагрева в 4 раза выше, чем для монтажного паяльника, а скорость зависит от коэффициента перекрытия зазора и при его оптимальных значениях достигает $80^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

С помощью индуктирующего элемента, выполненного на магнитопроводе из феррита марки 600 НН, можно осуществлять пайку контактов разъемов на печатные платы, герметизацию металло-стеклянных корпусов ИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вологдин В.В., Куц Э.В., Асамов В.В. *Индукционная пайка*. Л.: Машиностроение, 1989. 72 с.
2. Румак Н.В., Ланин В.Л., Чернышев И.Н. Экономичный бесконтактный нагрев энергией переменного магнитного поля. *Весті АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. 1994, (2), 94–96.
3. Zin S., Semiatin S.L. *Elements of Induction Heating: Design, Control, and Application*. Ohio: ASM International, 1988. 335 p.
4. Lupi S., Muhlbauer A. *Induction Heating – Industrial applications*. UIE, Paris, 1992, 144.
5. Ланин В.Л. Высокочастотный электромагнитный нагрев для пайки электронных устройств. *Технологии в электронной промышленности*. 2007, (5), 46–49. http://www.tech-e.ru/2007_5_46.php.
6. Rapoport E., Pleshivtseva Y. *Optimal Control of Induction Heating Processes*. Boca Raton, CRC Press, 2006. 341 p.

Поступила 11.11.11

Summary

Induction devices of a transformer-type with a magnetic core are capable to very accurately maintain the temperature of heating details at high heat transfer at assembly soldering. The maximum speed of heating at optimum parameters of the process reaches $80^{\circ}\text{C}/\text{с}$, which allows to realize contactless heating of small-size details in the magnetic gap of a transformer-type inductor.