

# Высокоэффективные индукционные устройства для монтажной пайки в электронике

**Индукционные нагревательные устройства на магнитопроводе из феррита с незамкнутой магнитной цепью обладают высокой скоростью бесконтактного и локального нагрева проводящих материалов и эффективны для монтажной пайки в электронике. Для формирования качественных паяных соединений необходима оптимальная конструкция индуктора, концентрирующая магнитный поток в зоне пайки, и оптимизация температурного профиля нагрева.**

**Владимир Ланин,  
профессор**

vlanin@bsuir.by

**Особенности применения  
индукционного нагрева**

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. за счет вихревых токов, индуцируемых в проводящих материалах.

Наиболее важные преимущества ВЧ-нагрева:

- Высокая плотность энергии создается вихревыми токами непосредственно в материале, что обеспечивает высокую скорость нагрева.
- Локализация нагрева в пределах обрабатываемой зоны.
- Нагрев в любой среде, включая вакуум или инертный газ.
- Высокая экологическая чистота процесса.
- Улучшение растекания припоя и перемешивание расплава металла за счет возникновения электродинамических сил.

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  $b/h < 0,5-1$  требует значительных удельных мощностей (до  $10^6$  Вт/м<sup>2</sup>) [1]. Такой нагрев применяют для конструкционной пайки волноводных трактов, металлбумажных конденсаторов, коммутационных элементов, твердосплавного инструмента и т. д. [2].

Индукторы соленоидального типа, изготавливаемые из медной трубки, характеризуются значитель-

ным рассеянием магнитного потока, низким КПД (0,2–0,4), необходимостью электрической и тепловой изоляции от нагреваемых поверхностей деталей и водяным охлаждением во время работы. Источники ВЧ-энергии — ламповые генераторы — имеют значительные массо-габаритные характеристики и также требуют принудительного водяного охлаждения.

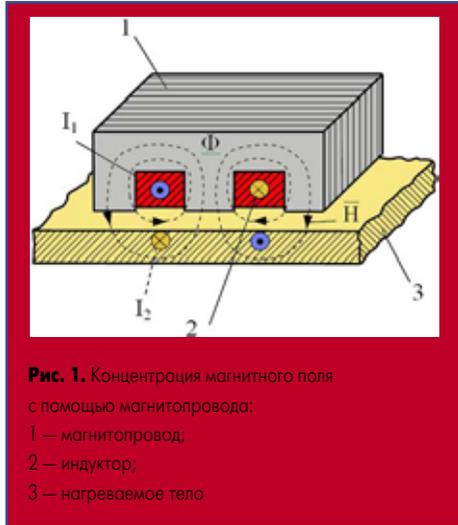
Качество паяемых соединений в процессах ВЧ-пайки зависит от конструкции индуктора и магнитопровода, скорости нагрева деталей и припоя, избирательности и локальности ВЧ-нагрева, равномерности и регулируемости нагрева во времени и по сечению паяемых деталей [3].

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

Воздействие энергии электромагнитного поля позволяет осуществить не только высокопроизводительный бесконтактный нагрев деталей с помощью наведенных в них вихревых токов высокой частоты, но и активировать припой за счет вихревых токов и пондеромоторных сил и улучшить его растекание по паяемым поверхностям. Предложены новые конструкции и исследованы параметры индуктирующих устройств на магнитопроводе, в которых нагрев проводящих материалов осуществляется в зазоре магнитопровода.

**Устройства индукционного нагрева на магнитопроводах**

Повышение локальности и эффективности индукционного нагрева достигают с помощью магнитопроводов из феррита, устанавливаемых на индукторе вблизи нагреваемых мест, которые концентрируют магнитный поток в зоне нагрева (рис. 1).

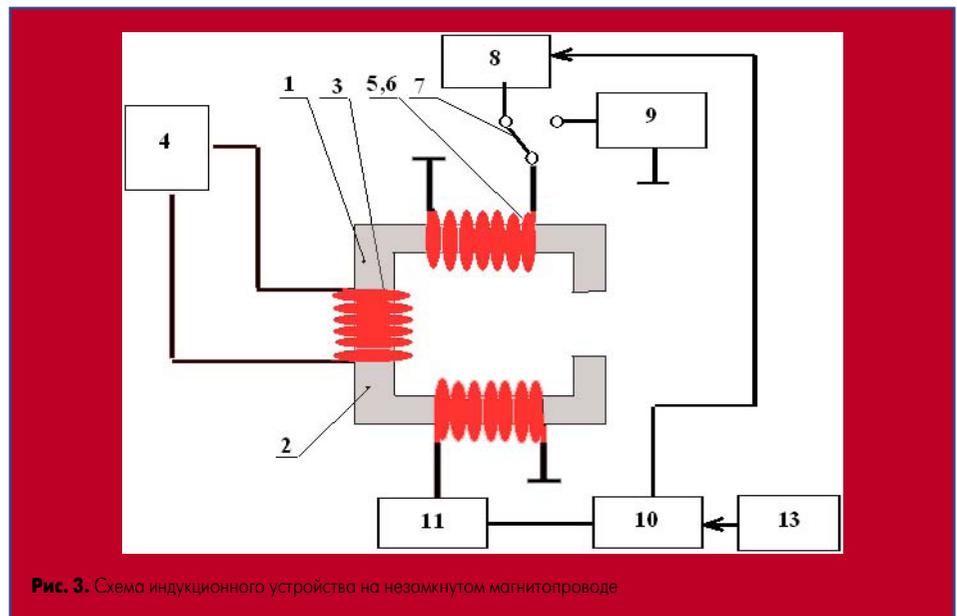
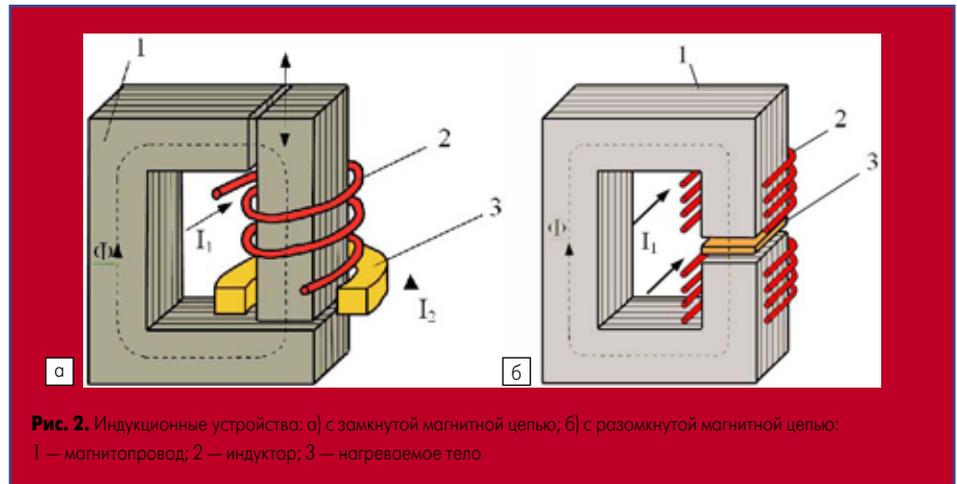


Прогресс в области индукционного нагрева при монтажной пайке достигнут за счет разработки новых конструкций индуктирующих устройств и применения новой элементной базы в ВЧ источниках питания. Нагрев переменным электромагнитным полем в зазоре магнитопровода индукционного устройства с открытой магнитной цепью обеспечивает высокую скорость при небольших удельных мощностях, однако сильно зависит от материала детали и геометрических параметров устройства [4].

Для нагрева колец, небольших плат, проводов используют индукционные устройства с замкнутой и разомкнутой магнитной цепью (рис. 2). В первом случае нагреваемая деталь размещается вне магнитопровода, охватывая его наружную поверхность, а во втором — в зазоре магнитопровода [5].

Впервые индукционное устройство с разомкнутой магнитной цепью предложили применить для герметизации корпусов полупроводниковых приборов ВЧ-пайкой [7]. Магнитопровод индуктора (рис. 3) состоял из двух сердечников 1 и 2 ферромагнитного материала, в зазоре которых осуществлялся нагрев деталей. Рабочая обмотка 3 охватывала оба сердечника и подключалась к ВЧ-генератору 4. Обмотка подмагничивания постоянным током состояла из двух секций 5 и 6 и была подключена с помощью переключателя 7 к выходу усилителя 8 постоянного тока или к входу регулирующего выпрямителя 9. Вход усилителя 8 подключен к выходу сравнивающего устройства 10, один из входов которого подключен к выходу выпрямителя 11, запитанного от обмотки 12 обратной связи, а второй — к источнику 13 опорного напряжения.

В основу регулирования положена зависимость магнитной проницаемости магнитопровода на переменном токе от величины под-



магничивания постоянного тока. Увеличивая ток подмагничивания, изменяли магнитную проницаемость магнитопровода, а следовательно — и напряженность ВЧ-поля в зазоре магнитопровода при неизменном напряжении высокой частоты на обмотке 3. Тем самым обеспечивалась параллельная работа двух и более индукторов от одного генератора для повышения производительности процесса.

Высокий потенциал автоматизации процесса индукционной пайки значительно снижается из-за возможной ошибки оператора. В настоящее время необходимы мощные, бесконтактные паяльные системы, пригодные как для интегрированного производства, так и для автономного применения.

Индукционные паяльные системы компании iTherms Technologies (США) [7] обеспечивают способность быстрого нагрева локализованной зоны деталей, что устраняет различные металлургические и механические изменения в конструкции. Способность нагрева только локальной зоны предотвращает вытекание припоя из намеченного места присоединения деталей. Высокая надежность и повторяемость соединений достигаются вследствие высокой точности контроля мощности ВЧ-генератора (не более 1% от установленного значения уровня мощности) при временном разрешении до 100 мс.

Традиционные мощные источники индукционного нагрева основаны на больших токах в индукторе при низких напряжениях и высокой частоте для генерации переменного магнитного поля, которое создает вихревые токи в нагреваемой детали. Традиционные индукционные нагревательные индукторы конструируются из медной трубки и охлаждаются водой.

Индукционные устройства типа HIG (Harmonic Inductive Gain) основаны на более низких токах в индукторе при несколько больших ВЧ-напряжениях, создаваемых портативными ВЧ-генераторами (рис. 4). HIG индукционные нагревательные устройства конструируются с помощью магнитопроводов из феррита





Рис. 5. Индукционное устройство на незамкнутом магнитопроводе

с незамкнутой магнитной цепью (рис. 5), а для обмоток применяют высокоэффективный на частотах порядка 500 кГц многожильный провод Litz (литцендрат). Источники питания и индукторы имеют воздушное охлаждение, что является большим преимуществом.

Индукционные устройства типа НIG применены для пайки коаксиального кабеля к коннектору при мощности нагрева 250 Вт и времени пайки 2,5 с (рис. 6а) и проводов к электронному модулю при мощности 190 Вт (рис. 6б). При пайке трех проводов к плате тепло фокусируется таким образом, что изоляция на проводах не расплавляется.

Длинные проводящие ленточные выводы паялись к фотоэлектрическим ячейкам (рис. 7) с помощью модифицированного Orthos-индуктора.

### Температурные профили индукционных устройств

Индукционное устройство для формирования контактных соединений легкоплавкими припоями содержит магнитопровод из феррита марки 600 НН с незамкнутой магнитной цепью и обмотки. Индуктирующая обмотка подключалась к ВЧ-генератору 1 (рис. 8). 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



Рис. 6. Пайка коаксиального кабеля (а) и проводов к плате (б)

обмотку подавали постоянный или переменный ток подмагничивания величиной 1–5 А от источника 3.

Величина напряженности магнитного поля рассчитывалась как:

$$H = U_m / \mu_0 (4,44 S \times f \times w), \quad (1)$$

где  $U_m$  — амплитуда напряжения на рамке,  $\mu_0$  — 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 паяемым деталям сообщали НЧ-вибрации путем подачи переменного тока подмагничивания частотой 50–100 Гц и амплитудой 1–10 А в обмотку подмагничивания. Амплитуда вибраций деталей пропорциональна величине тока подмагничивания, магнитной проницаемости материала, длине незакрепленной части детали и составляет 0,5–5 мм. 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.

Анализ температурных зависимостей в зоне нагрева (рис. 9) 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 пайки изделий небольших размеров из металлов и сплавов при полном перекрытии зазора магнитопровода.



Рис. 7. Пайка ленточных проводников к фотоэлектрическим ячейкам

Напряженность магнитного поля максимальна в центре зазора магнитопровода индукционного устройства и достигает  $(15–25) \times 10^3$  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.

Исследована зависимость температуры нагрева объекта от коэффициента перекрытия зазора при амплитуде напряжения на индукторе 150 В и частоте электромагнитных колебаний 66 кГц. 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.

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 нагрева. Максимальная скорость нагрева при полной выходной мощности генератора достигает 40 °С/с на частоте 66 кГц, что позволяет реализовать высокоэффективный бесконтактный нагрев небольших по размеру деталей в зазоре магнитопровода индуктора и почти в 2,5–3 раза повысить производительность труда по сравнению с пайкой паяльником (рис. 10).

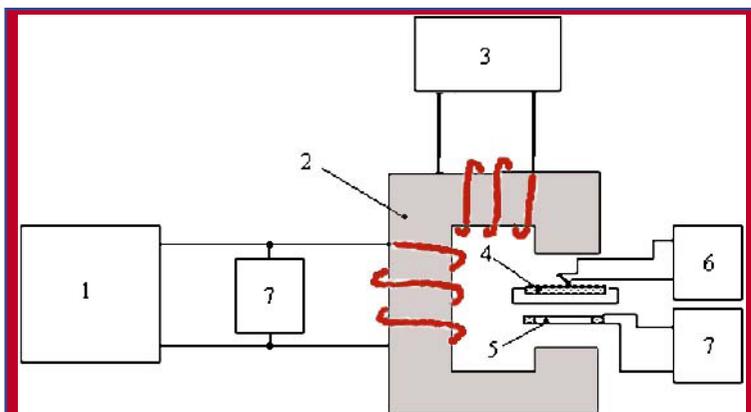


Рис. 8. Схема индукционного нагрева в зазоре магнитопровода:

1 — генератор; 2 — магнитопровод; 3 — источник тока; 4 — изделие; 5 — измерительная рамка; 6 — измеритель температуры; 7 — вольтметр

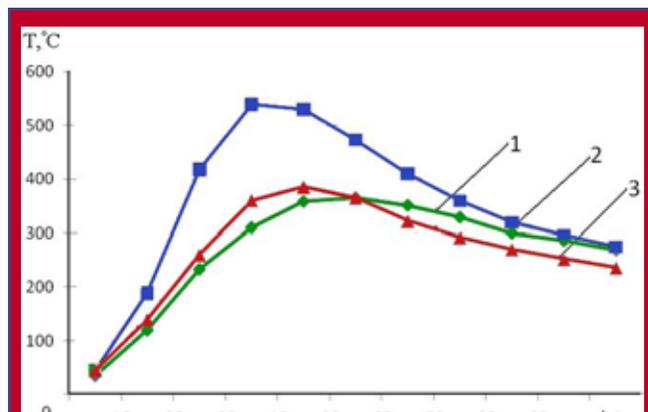


Рис. 9. Зависимость температуры нагрева для различных металлов: 1 — сталь ( $\mu = 40$ ); 2 — сплав 29Ni18K ( $\mu = 200$ ); 3 — медь

## Выводы

Для пайки малогабаритных и миниатюрных деталей эффективен индукционный нагрев, 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 2,5–3 раза выше, чем для монтажного паяльника, а скорость нагрева зависит от коэффициента перекрытия зазора и при его оптимальных значениях от 0,75 до 4 достигает 40 °C/с.

С помощью индукционного устройства, выполненного на магнитопроводе, можно осуществлять пайку силовых контактов, разъемов и проводов на печатные платы, коаксиальных кабелей и герметизацию металлостеклянных корпусов ИС.

## Литература

1. Induction Heating. Industrial Applications / Ed. by S. Lupi. Paris, U.I.E., 1992.
2. Вологдин В. В., Куш Э. В., Асамов В. В. Индукционная пайка. Л.: Машиностроение, 1989.
3. Zin S., Semiatin S. L. Elements of Induction Heating: Design, Control, and Application. Ohio: ASM International, 1988.
4. Румак Н. В., Ланин В. Л., Чернышев И. Н. Экономичный бесконтактный нагрев энергией переменного магнитного поля // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1994. № 2.
5. Ланин В. Л. Высокочастотный электромагнитный нагрев для пайки электронных устройств // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 5.
6. Индуктор для ВЧ-нагрева: а. с. 302853 СССР/Н. Ф. Глебо, В. Ф. Юрин, В. А. Жестовский. Опубл. в Б.И. 1971. № 15.
7. Induction Soldering with HIG inside // [www.item.com/solderingbrochure.pdf](http://www.item.com/solderingbrochure.pdf)

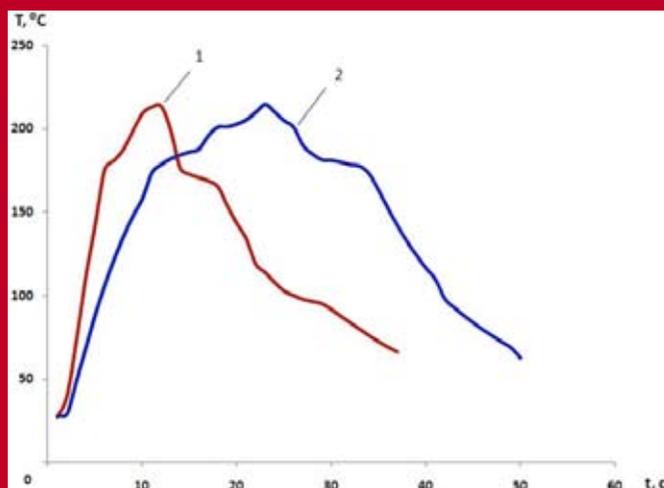


Рис. 10. Температурные профили нагрева индукционным устройством (1) и паяльником 40 Вт (2) силового контакта на плате

Индукционное устройство применено для герметизации пайкой корпусов интегральных схем (ИС) с планарными выводами в корпусе типа 101МС14-1, 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<sup>2</sup> при напряжении на индуктирующей обмотке 200 В.

Через 3 секунды 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.

Индукционное устройство применено для пайки контактов и разъемов при сборке силового электронного модуля (рис. 11). На места соединений наносилась припойная паста ПП-250. Пайка каждого контакта осуществлялась индивидуально в течение 8–10 с.



Рис. 11. Силовые контакты на печатной плате