

# Экономичный индукционный нагрев для пайки в зазоре магнитопровода

**Выбор технологии бесконтактного нагрева определяет эффективность технологического процесса, сведение к минимуму человеческого фактора и увеличение качества изделий. Индукционные нагревательные устройства на магнитопроводе из феррита с незамкнутой магнитной цепью обладают высокой скоростью бесконтактного нагрева проводящих материалов и отличаются низким энергопотреблением. Для формирования качественных паяных соединений необходима оптимизация температурного профиля индукционного нагрева.**

**Владимир Ланин  
Иван Сергачев**

## Сравнительная характеристика методов нагрева

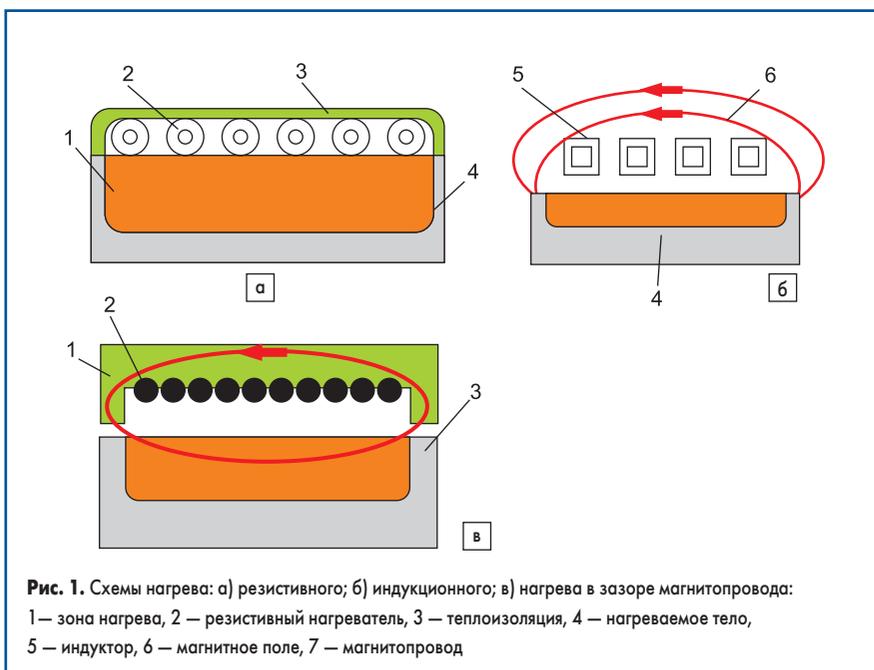
Большое число технологических процессов в промышленности, такие как закалка, сварка, пайка, литье, протяжка металла, основаны на использовании нагрева, который может осуществляться контактными и бесконтактными методами. Выбор необходимой технологии нагрева для конкретного процесса определяет его эффективность, снижение длительности производственного цикла, увеличение воспроизводимости параметров изделия и сведение к минимуму человеческого фактора. При выборе учитывают диапазон температур нагрева, удельную мощность, экологические требования (табл. 1).

Широко применяемый резистивный нагрев представляет собой простую схему, в которой пропу-

скают ток через резистивные элементы и тем самым осуществляют выделение тепла (рис. 1а). Несмотря на то что это самое экономичное решение, необходим контакт между нагревательным элементом и нагреваемым объектом, чтобы передать тепловую энергию. Потребность в электроизоляции для нагревательных элементов уменьшает эффективность, поскольку диэлектрики часто являются хорошими проводниками тепла. Кроме того, тепловые напряжения, возникающие вследствие длительности процесса нагрева, могут значительно уменьшить жизненный цикл нагреваемого объекта.

В отличие от резистивного нагрева, индукционный исключает тепловое сопротивление между нагреваемым объектом и индуктором. Механизм беспроводной передачи тепла работает по принципу трансформатора. Переменный ток протекает через индуктор, создавая переменное магнитное поле, которое генерирует в поверхности нагреваемого объекта большое количество вихревых токов (рис. 1б). Этот метод не требует термического контакта и не допускает значительных тепловых напряжений как в нагревательном элементе, так и в объекте.

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,



**Рис. 1.** Схемы нагрева: а) резистивного; б) индукционного; в) нагрева в зазоре магнитопровода:  
1 — зона нагрева, 2 — резистивный нагреватель, 3 — теплоизоляция, 4 — нагреваемое тело,  
5 — индуктор, 6 — магнитное поле, 7 — магнитопровод

**Таблица 1.** Параметры нагревателей

Параметры	Виды нагрева		
	Резистивный	Индукционный	HIG
Удельная мощность	средняя	высокая	высокая
Ток в нагревателе	большой	большой	небольшой
Охлаждение	—	водяное	воздушное
Температура	ограниченная	высокая	средняя
Надежность	ограниченная	ограниченная	высокая
Стоимость	средняя	высокая	низкая

сварке, пайке, выращивании кристаллов и т. д. за счет вихревых токов, индуцируемых в проводящих материалах [1]. К преимуществами ВЧ-нагрева относятся:

- высокая плотность энергии, создаваемая 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.

Традиционный индукционный нагрев с водоохлаждаемыми медными индукторами применяется для термообработки и оплавления металлов. Индукторы соленоидального типа, изготавливаемые из медной трубки, характеризуются значительным рассеянием магнитного потока, низким КПД (0,2–0,4), необходимостью электрической и тепловой изоляции от нагреваемых поверхностей объектов и водяным охлаждением во время работы. Источники ВЧ-энергии — ламповые генераторы имеют значительные массогабаритные характеристики и также требуют принудительного водяного охлаждения.

В традиционном индукционном нагреве существуют определенные физические ограничения и проблемы. Обычно ВЧ-генератор создает постоянный синусоидальный сигнал с резонансной частотой обмотки и конденсатора колебательного контура. В данной системе частоты частот преобразователя и колебательного контура необходима для настройки резонансного контура больших систем, которые требуют комплексного контроля параметров.

Из трех возможных методов подачи большого объема мощности в таких системах (увеличение частоты, напряжения или тока) увеличение силы тока является самым логичным выбором. Повышение напряжения потребовало бы применения более мощных конденсаторов, а увеличение частоты становится довольно сложным процессом и связано с ростом потерь. Эти потери вызывают паразитный нагрев, необходимость использования громоздких жидкостных систем охлаждения, больших намоток с меньшей гибкостью.

Повышение локальности и эффективности индукционного нагрева достигается с помощью магнитопроводов из феррита, устанавливаемых на индукторе вблизи нагреваемых мест, которые концентрируют магнитный поток в зоне нагрева и могут быть с замкнутой или разомкнутой магнитной цепью (рис. 1в). Нагрев переменным электромагнитным полем в зазоре магнитопровода индукционного устройства с открытой магнитной цепью обеспечивает высокую скорость при небольших удельных мощностях, однако в значительной степени зависит от материала детали и геометрических параметров устройства [2].

Компанией iTherm Technologies (США) предложена технология встроенного индукционного нагрева Harmonic Inductive Gain (HIG), которая сочетает все достоинства традиционного индукционного нагрева и рези-

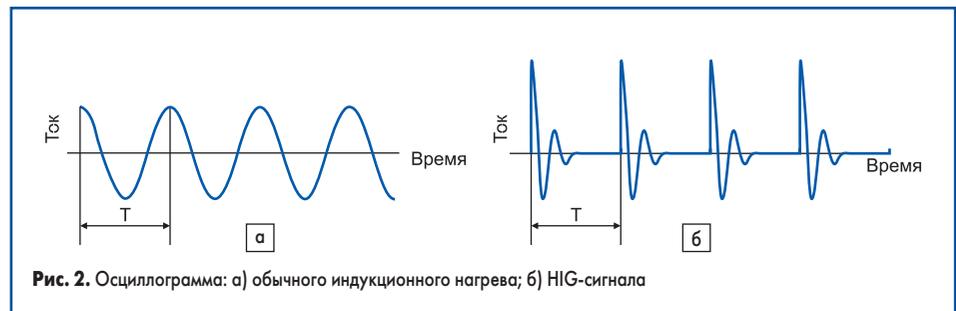


Рис. 2. Осциллограмма: а) обычного индукционного нагрева; б) HIG-сигнала

стивного нагрева [3]. Это возможно благодаря использованию пульсирующего тока вместо синусоидального. Пульсирующий ток работает на основе быстрой зарядки конденсаторов и разрядки через индукционную обмотку. Результирующая резистивно-индуктивно-емкостная цепь способна производить колебания резонансной частоты пока, сигнал затухает из-за внутреннего сопротивления обрабатываемого объекта. Итоговый импульс с увеличенной плотностью мощности для различных видов применения может достигать частоты до 500 кГц (рис. 2).

Увеличение и уменьшение выходной мощности выполняется с помощью HIG простым повышением или сокращением частоты импульсов. Технология HIG отвечает всем вышеперечисленным характеристикам, совмещая преимущества технологий индукционного и резистивного нагрева и предназначена для таких работ, как пайка, отжиг, закалка, металлическое литье, протяжка металла, и других.

В резистивных нагревателях контроль нагрева осуществляется достаточно просто. Нагревательные элементы обычно включаются и выключаются через определенные интервалы, вне зависимости от частоты источника питания. Интервалы определяются в соответствии с необходимой мощностью системы. Чем больше отношение времени включения элементов к периоду выключения, тем большая мощность достигается.

При индукционном нагреве объект достигает значительного уровня мощности в магнитном поле вокруг обмотки, поэтому необходимо точно определять момент переключения индукции. При переключении в момент высокой энергии она произведет скачок напряжения, который может вывести из строя систему контроля. Для предотвращения выхода из строя системы контроля следует производить включение элементов при нулевом значении тока.

### Устройства индукционного нагрева на магнитопроводах

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

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 очень зависит от материала детали и геометрических параметров устройства [4].

Индукционные паяльные системы компании iTherm Technologies (США) обеспечивают быстрый нагрев локализованной зоны деталей, что устраняет различные металлургические и механические изменения в конструкции. Способность нагревать только локальную зону предотвращает вытекание припоя из места присоединения деталей. Высокая надежность и повторяемость соединений достигаются вследствие высокой точности контроля мощности ВЧ-генератора — не более 1% от установленного значения уровня мощности и временным разрешением до 100 мс.

Индукционные устройства типа HIG основаны на более низких токах в индукторе при нескольких больших ВЧ-напряжениях, создаваемых портативными ВЧ-генераторами (рис. 3а). Индукционные нагревательные HIG-устройства конструируют с помощью магнитопроводов из феррита с незамкнутой магнитной цепью (рис. 3б), 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 HIG предназначены для пайки коаксиального кабеля к коннектору при мощности нагрева 250 Вт



Рис. 3. а) Высокочастотный генератор; б) индукционное устройство на незамкнутом магнитопроводе



**Рис. 4.** Пайка к плате:  
а) коаксиального кабеля; б) проводов к плате

и времени пайки 2,5 с (рис. 4а) и проводов к электронному модулю при мощности 190 Вт (рис. 4б). При пайке трех проводов к плате тепло фокусируется таким образом, что изоляция на проводах не расплавляется.

Длинные проводящие ленточные выводы паялись к фотоэлектрическим ячейкам с помощью модифицированного Orthos-индуктора.

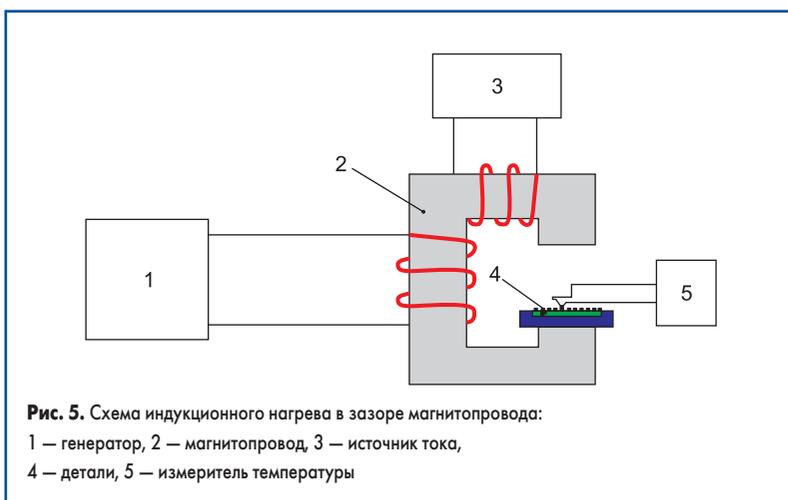
**Температурные профили индукционных устройств**

Индукционное устройство для формирования контактных соединений легкоплавкими припоями содержит П-образный магнитопровод из феррита марки 600 НН с незамкнутой магнитной цепью и две обмотки. Индуцирующая обмотка (рис. 5) подключалась к ВЧ-генератору (1). Параметры ВЧ-напряжения контролировались вольтметром В7-73/1 и частотомером ЧЗ-67. Температура в рабочей зоне измерялась с помощью термопары ХК, прикрепленной к детали (4) и цифрового измерителя температуры (5). Напряженность магнитного поля в зазоре магнитопровода (2) оценивали по величине ЭДС в измерительной рамке вольтметром 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) [4].

Величина напряженности магнитного поля рассчитывалась как:

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

где  $U_m$  — амплитуда напряжения на рамке;  $\mu_0$  — абсолютная магнитная проницаемость;  $S$  — площадь рамки;  $f$  — частота тока;  $w$  — число витков рамки.



**Рис. 5.** Схема индукционного нагрева в зазоре магнитопровода:  
1 — генератор, 2 — магнитопровод, 3 — источник тока, 4 — детали, 5 — измеритель температуры



**Рис. 7.** Схема измерения температуры:  
1 — магнитопровод; 2 — плата; 3 — датчик температуры (термопара); 4 — измеритель-регулятор ТРМ210; 5 — автоматический преобразователь интерфейса АС4; 6 — персональный компьютер

Магнитная индукция в зазоре магнитопровода определялась следующим образом:

$$B = \mu_0 H = \mu_0 IN / l, \quad (2)$$

где  $I$  — ток в обмотке,  $N$  — число витков,  $l$  — длина обмотки.

Наблюдался линейный рост напряженности магнитного поля в зазоре магнитопровода в зависимости от напряжения на обмотке и тока подмагничивания (рис. 6). Напряженность магнитного поля максимальна в центре зазора магнитопровода индукционного устройства и достигала  $(15-25) \times 10^5$  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. Магнитная индукция в зазоре магнитопровода составила 0,5–2 Тл.

Для активации растекания припоя при ВЧ-нагреве в зазоре магнитопровода индуктора с момента расплавления припоя до завершения его растекания паяемым деталям сообщали НЧ-вибрации подачей 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 составляла 0,5–5 мм. Направление вибраций паяемых деталей выбирали таким образом, чтобы они совпадали с направлением вектора средней

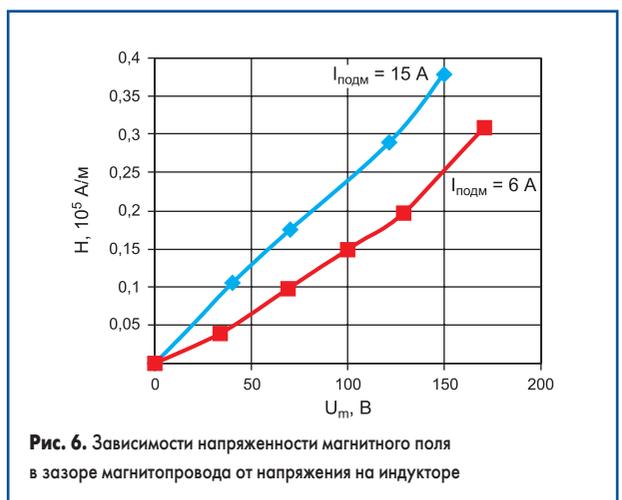
скорости течения припоя в паяемый зазор, что достигалось соответствующей ориентацией изделия в зазоре магнитопровода.

В качестве измерителя температуры использовался измеритель-регулятор ОВЕН ТРМ201. Структурная схема измерений температурного профиля нагрева приведена на рис. 7. Подключение производится посредством встроенного интерфейса RS-485, преобразование интерфейсов из RS-485 в USB реализовано с использованием автоматического преобразователя USB/RS-485 ОВЕН АС4.

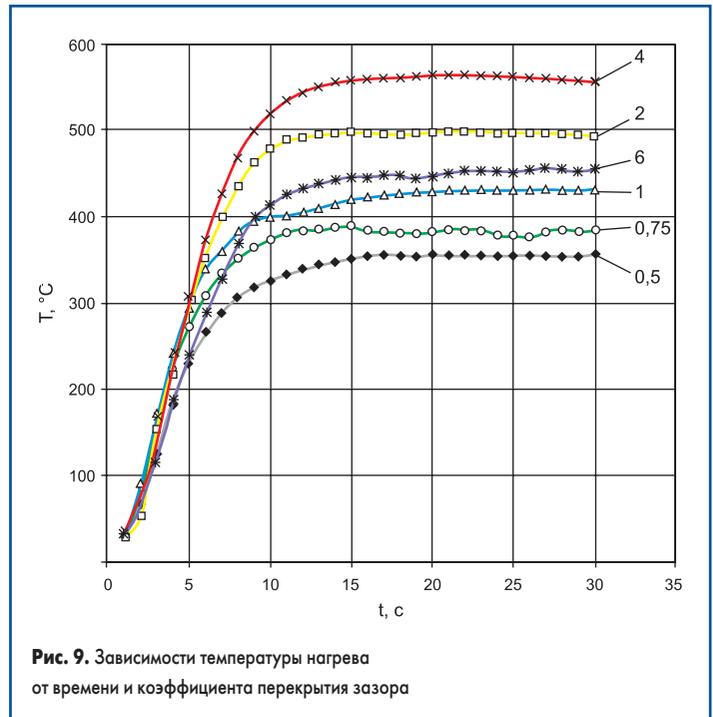
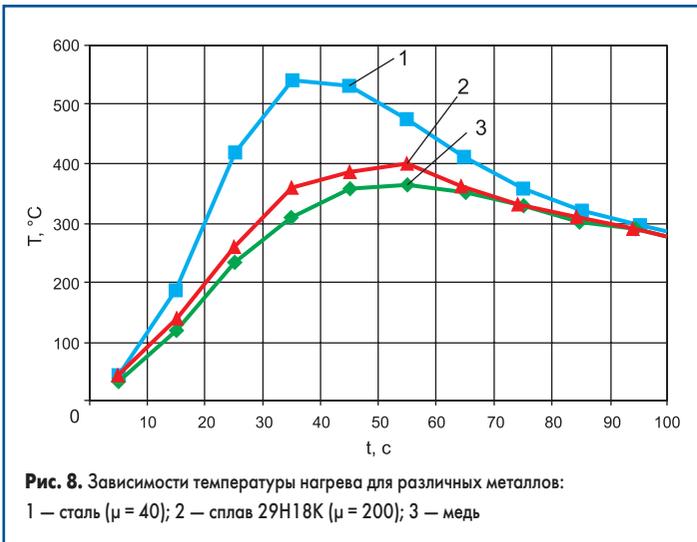
Для контроля температурного профиля индукционного нагрева и частоты генератора использовался персональный компьютер, имеющий следующие характеристики: OS Windows XP, CPU Intel Pentium Dual-Core E5400 2700 МГц, RAM 2 Гбит.

Анализ температурных зависимостей в зоне нагрева (рис. 8) показал, что магнитные материалы, такие как никелевые сплавы, нагреваются с большей скоростью, а затем в результате магнитных превращений скорость нагрева падает. Поэтому данная конструкция индукционного устройства рациональна для пайки изделий небольших размеров из металлов и сплавов при полном перекрытии зазора магнитопровода.

Исследованы зависимости 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 нагре-



**Рис. 6.** Зависимости напряженности магнитного поля в зазоре магнитопровода от напряжения на индукторе

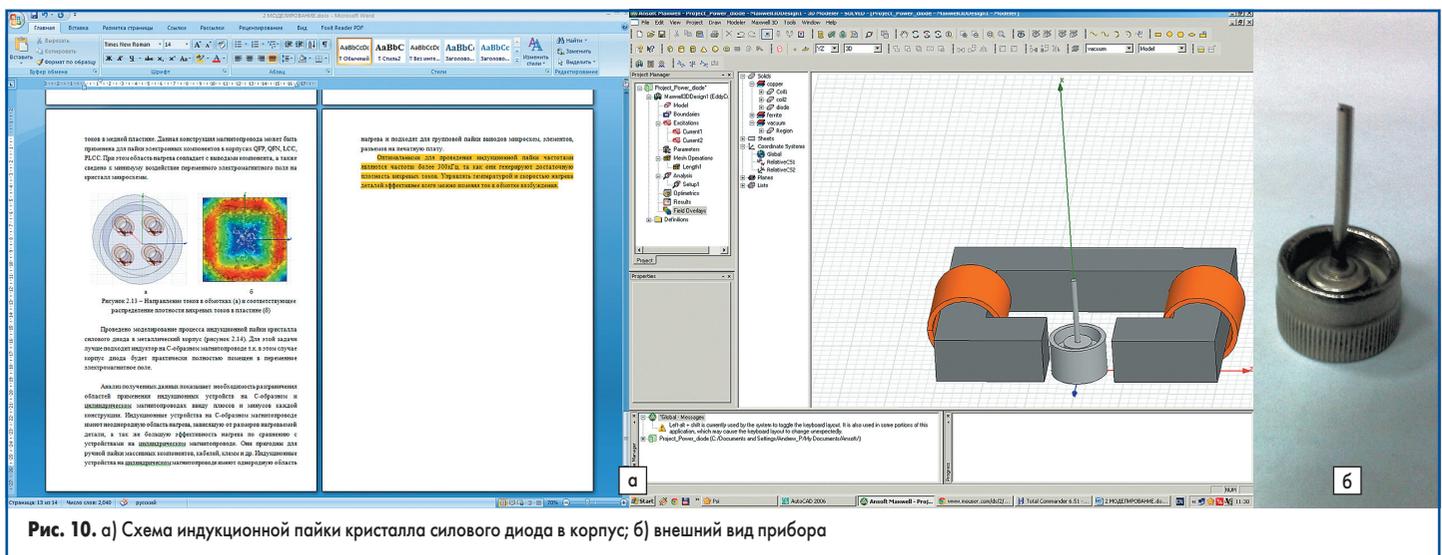
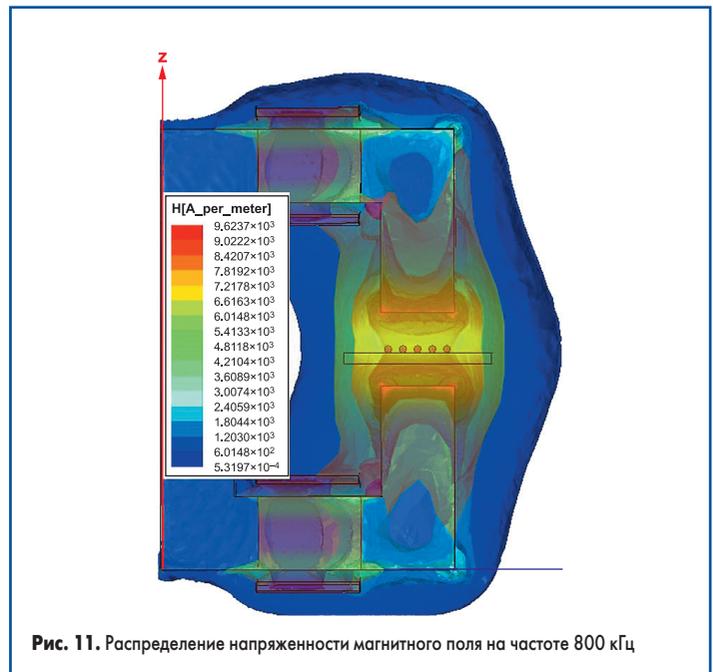


вается в течение продолжительного времени (более 30 с), так как в ней индуцируется малая плотность вихревых токов и мощности нагрева не хватает, чтобы компенсировать потери тепла в окружающую среду. При  $K > 4$  эффективность нагрева также снижается в связи с увеличением поверхности детали и отдачи части тепла за счет конвекции (рис. 9).

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 выходной мощности генератора 2 кВт достигает  $40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  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).

Экономичный индукционный нагрев применен для пайки кристаллов силовых диодов в металлический корпус (рис. 10). Поверхность кристалла была предварительно металлизирована напылением, в качестве припоя использовался бессвинцовый припой ПОМ 3. Индукционная пайка проводилась на частоте 33 кГц при токе в катушке возбуждения 6 и 10 А. Время пайки составило 50 и 28 с соответственно.

Для индукционного нагрева шариков припоя Sn-Pb диаметром 0,8 мм на печатной плате из стеклотекстолита FR4 в диапазоне частот 0,5–1 МГц и токе возбуждения 2 А получено распределение магнитного поля в пространстве и вихревых токов в шарике припоя. Результаты наглядно показывают роль магнитопровода как концентратора электромагнитной энергии, поскольку основная часть энергии электромагнитного поля сконцентрирована в области зазора (рис. 11). Небольшие потери электромагнитной энергии наблюдаются в местах изгиба магнитопровода, поэтому в конструкции магнитопровода необходимо предусмотреть округление прямых углов для минимизации потерь.



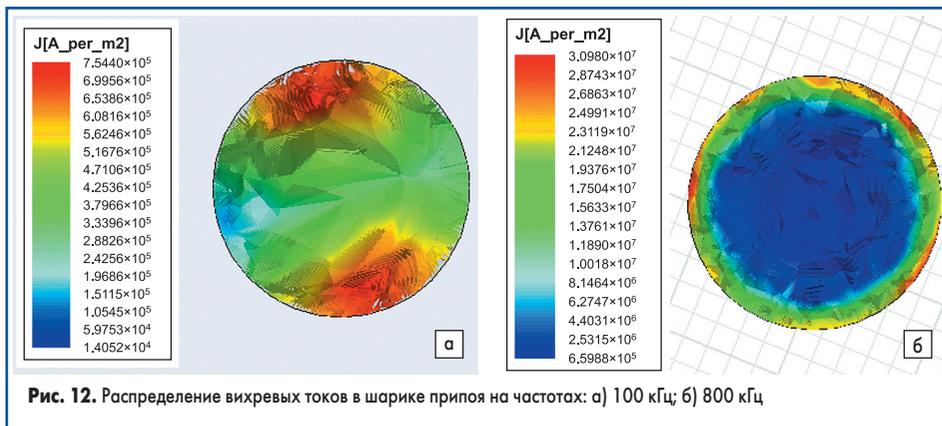


Рис. 12. Распределение вихревых токов в шарике припоя на частотах: а) 100 кГц; б) 800 кГц

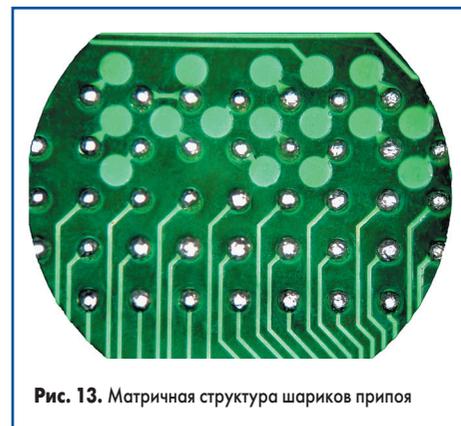


Рис. 13. Матричная структура шариков припоя

Таблица 2. Зависимость плотности поверхностных токов от частоты

Частота, кГц	Плотность поверхностных токов, А/м <sup>2</sup>
50	2,7×10 <sup>5</sup>
200	5,9×10 <sup>6</sup>
400	1,5×10 <sup>7</sup>
600	2,4×10 <sup>7</sup>
800	3×10 <sup>7</sup>
1000	3,2×10 <sup>7</sup>

Результаты моделирования в ANSOFT MAXWELL распределения вихревых токов в шарике припоя подтверждают наличие скин-эффекта (рис. 12). С повышением частоты происходит вытеснение вихревых токов к поверхности шарика припоя и увеличение численного значения плотности тока (табл. 2).

Таким образом, частоты в диапазоне 500–1000 кГц пригодны для осуществления процесса индукционной пайки в зазоре магнитопровода. Глубина проникновения вихревых токов составляет 0,1–0,2 мм, что позволяет использовать частоты выше 800 кГц для управления геометрией шарика припоя.

При этом поверхностный слой шарика припоя будет расплавляться и образовывать паяное соединение, а твердое ядро в центре будет поддерживать BGA-корпус компонента на необходимом расстоянии от платы. Внешний вид шариков припоя на контактных площадках диаметром 400 мкм приведен на рис. 13.

### 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 30–40 °C/с. С помощью индукционного устройства, выполненного на магнитопроводе с зазором, можно осуществлять пайку силовых контактов, разъемов и проводов на пе-

чатные платы, коаксиальных кабелей, герметизацию металлостеклянных корпусов ИС, формирование матричной структуры припоя для монтажа ИС в корпусе BGA.

### Литература

1. Lupi S. Induction Heating. Industrial Applications. Paris, U. I.E., 1992.
2. 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.
3. Kyle C. Embedded High-Power-Density Heating // Industrial Heating, 2008. № 9.
4. Ланин В. Л., Сергачев И. И. Высокоэффективные индукционные устройства для монтажной пайки в электронике // Технологии в электронной промышленности. 2012. № 1.
5. Lanin V. L., Sergachev I. I., Khotskin V. T. Induction Heating of Solder Ball Leads for Assembly of BGA Packages // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2015. Vol. 51. № 2.