

# Высокочастотный электромагнитный нагрев для пайки электронных устройств

**Проблемы энергосбережения в технологии заставляют вновь обратиться к процессам высокочастотного электромагнитного нагрева, обеспечивающим высокую скорость локального нагрева проводящих материалов в любой среде. Для формирования качественных паяных соединений в изделиях электроники необходим соответствующий выбор частоты нагрева, конструкции индукторного устройства и оптимизация режимов процесса.**

Владимир ЛАНИН

vlanin@bsuir.unibel.by

## Особенности высокочастотного нагрева

Воздействие энергии высокочастотных (ВЧ) электромагнитных колебаний позволяет осуществлять высокопроизводительный бесконтактный нагрев в различных процессах обработки проводящих материалов: термообработке, плавке, упрочнении, сварке, пайке, выращивании кристаллов и т. д. Наиболее важными преимуществами ВЧ-нагрева являются следующие:

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

Основы применения индукционного нагрева в России были заложены в 30–40-е годы В. П. Вологдиным, М. Г. Лозинским и Г. И. Бабатом [1–3], а в США — Э. Нортрапом (E. Northrup). Массовое применение в промышленности индукционный нагрев получил во время второй мировой войны как наиболее эффективный процесс упрочнения сталей [4].

Индукционный нагрев основан на использовании трех известных физических явлений: электромагнитной индукции, открытой Фарадеем, эффекте Джоуля и поверхностном эффекте. Согласно закону электромагнитной индукции в проводящем теле, движущемся со скоростью  $V$  в направлении  $x$  через магнитное поле с магнитным потоком  $\Phi$ , возникает индуцированное напряжение  $e$ :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} - v\frac{d\Phi}{dx}. \quad (1)$$

Это напряжение вызывает в проводящем теле вихревые токи, которые генерируют электрическую мощность нагрева в соответствии с законом Джоуля:

$$P_v = \rho \times S^2, \quad (2)$$

где  $S$  — плотность тока,  $\rho$  — электрическое сопротивление материала.

Выражение (1) показывает, что в индукционной нагревательной системе существуют два типа напряжения и вихревых токов. Первый тип вызван изменяющимся во времени магнитным потоком  $\Phi$ , который создается индуктором и проходит через неподвижное тело. Этот поток индуцирует напряжение и вихревые токи в проводящем теле как в короткозамкнутой обмотке трансформатора (рис. 1).

Второй тип индуцированного напряжения связан со скоростью  $V$  перемещения проводящего тела в неоднородном магнитном поле, при этом величина тока зависит от скорости перемещения тела. Такой вариант индукционного нагрева используется сравнительно редко.

Согласно поверхностному эффекту плотность вихревых токов внутри проводящего тела подчиняется выражению:

$$S_x = S_0 \times \exp(-x/\delta), \quad (3)$$

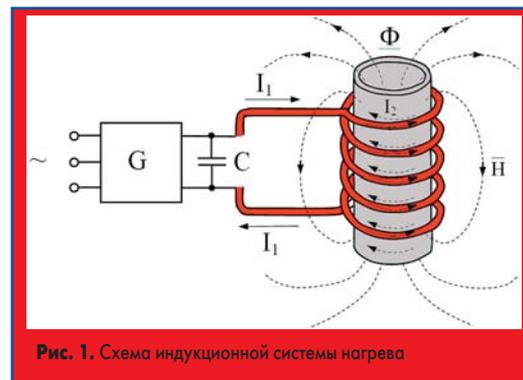
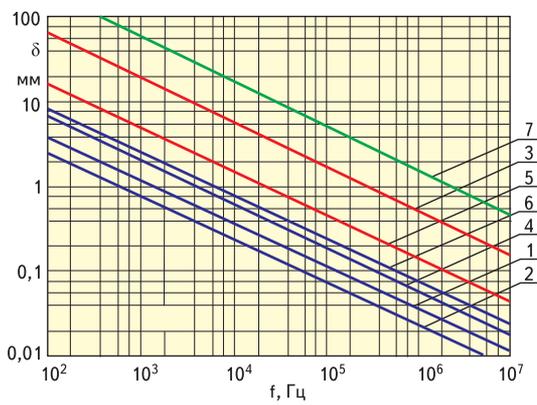
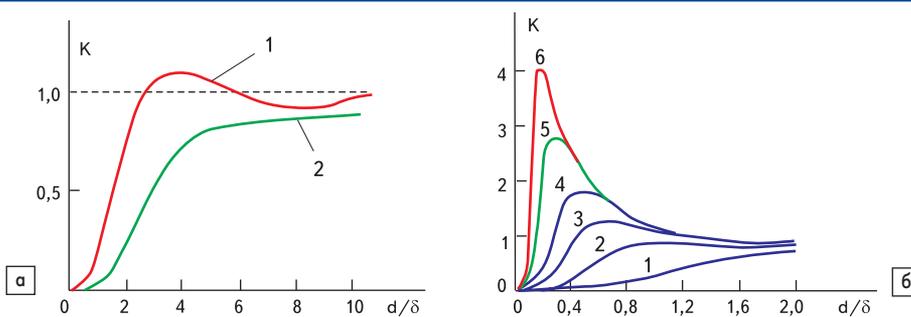


Рис. 1. Схема индукционной системы нагрева



**Рис. 2.** Зависимость глубины проникновения от частоты и свойств материалов: 1 — сталь ( $\mu = 40$ ), 2 — сталь ( $\mu = 100$ ), 3 — сталь (800 °С,  $\mu = 1$ ), 4 — медь, 5 — медь (800 °С), 6 — алюминий, 7 — графит



**Рис. 3.** Графики зависимости фактора К: а) для немагнитных плит (1) и цилиндров (2); б) немагнитных труб при  $h/d$ : 1–0,5; 2–0,2; 3–0,1; 4–0,05; 5–0,02; 6–0,01

где  $S_0$  — значение плотности тока на поверхности,  $\delta$  — глубина проникновения.

Распределение мощности нагрева по толщине в соответствии с выражениями (2) и (3) имеет вид:

$$P_v = P_{v0} \times \exp(-2x/\delta). \quad (4)$$

Согласно выражению (4) до 86% мощности нагрева создается в поверхностном слое проводящего тела толщиной  $\delta$ .

Глубина проникновения поля зависит от частоты тока  $f$ , удельного электрического сопротивления материала  $\rho$  и магнитной проницаемости  $\mu$ :

$$\delta = \sqrt{\rho / \pi \times f \times \mu_0 \times \mu}, \quad (5)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная поля.

Поскольку свойства нагреваемого материала зависят от температуры и интенсивности магнитного поля (для магнитных материалов), то глубина проникновения также зависит от этих параметров и снижается с ростом частоты тока (рис. 2).

Расчет выделяемой в изделии мощности при индукционном нагреве достаточно сложен, однако для большинства практических применений эту мощность можно определить, используя следующее выражение [5]:

$$P = H^2 S \times K / \delta, \quad (6)$$

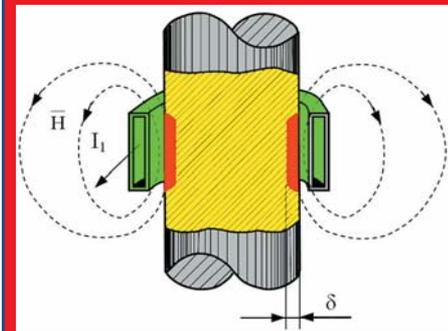
где  $S$  — площадь поверхности в нагретой зоне,  $K$  — фактор передачи, зависящий от формы и размеров тела.

На рис. 3. приведены графики зависимости  $K$  для тел, которые представляют собой плиты, цилиндры и трубы, от соотношения диаметра (толщины) и глубины проникновения.

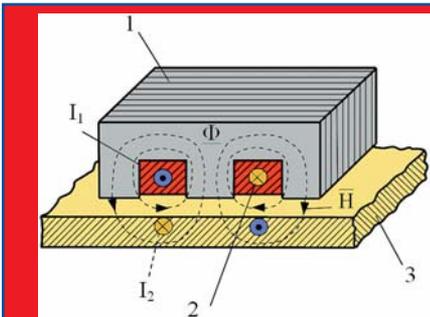
Фактор передачи энергии принимает максимальные значения при ярко выраженном поверхностном эффекте, что в свою очередь обусловлено выбором частоты тока.

### Конструкции индукционных нагревательных устройств

Индукционным нагревательным системам свойственны такие эффекты, как близости, кольцевой и концентрации магнитного поля. Первый эффект показывает, что вихревые токи создаются в непосредственной близости от индукционного витка. Чем выше частота тока и чем меньше зазор между витком и поверхно-



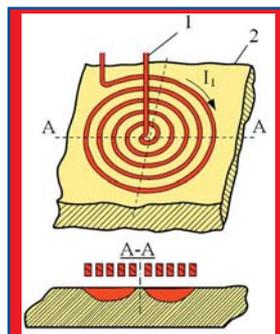
**Рис. 4.** Схема действия эффекта близости в индукционной системе нагрева



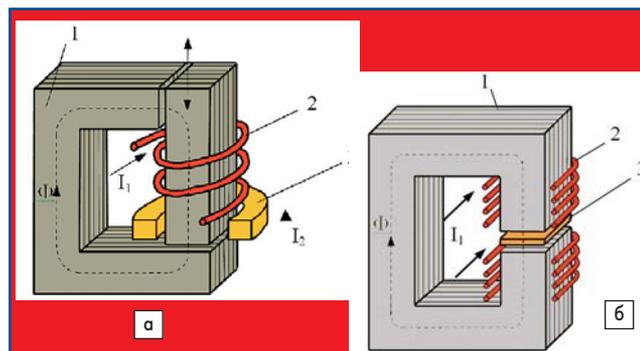
**Рис. 5.** Концентрация магнитного поля с помощью магнитопровода: 1 — магнитопровод, 2 — индуктор, 3 — нагреваемое тело

стью тела, тем больше эффект близости (рис. 4). Он вызывает также концентрацию вихревых токов на противоположных сторонах токоведущих шин. Кольцевой эффект заключается в концентрации силовых линий электромагнитного поля внутри индуктора типа соленоида. Используя магнитопровод определенной конструкции, можно создавать концентрацию силовых линий поля на заданной поверхности нагрева проводящего тела (рис. 5).

Существуют разнообразные конструкции индукционных нагревательных устройств [6–8]. Для сквозного нагрева проводящих тел круглого, квадратного и прямоугольного сечения применяют индукторы соленоидального типа (рис. 1), плоских тел — индукторы с магнитопроводом (рис. 5) или в виде плоской спирали (рис. 6). Для нагрева колец, небольших плит, проводов используют индукционные устройства с замкнутой и разомкнутой магнитной цепью (рис. 7).



**Рис. 6.** Индуктор в виде плоской спирали: 1 — спиральный индуктор, 2 — нагреваемое тело



**Рис. 7.** Индукционные системы: а) с замкнутой магнитной цепью; б) разомкнутой магнитной цепью: 1 — магнитопровод, 2 — индуктор, 3 — нагреваемое тело

Качество паяных соединений в индукционных нагревательных системах зависит от следующих факторов ВЧ-нагрева: времени, скорости, площади зоны нагрева, плотности мощности и др. [9]. Эффективность нагрева определяется электрофизическими свойствами материалов, частотой тока и конструктивными параметрами индукционных устройств.

### Оптимизация параметров ВЧ-нагрева для пайки электронных устройств

Для пайки электронных устройств характерны невысокая удельная мощность нагрева, малые габариты изделий и их чувствительность к электромагнитным наводкам. Поэтому необходимо оптимизировать такие параметры ВЧ-нагрева, как эффективная мощность, выделяемая в зоне нагрева, и коэффициент полезного действия (КПД) нагрева.

Эффективная мощность ВЧ-нагрева в общем случае равна:

$$P_{эф} = \frac{U_{эф}^2 \cos \varphi \times \eta}{R_u}, \quad (7)$$

где  $U_{эф}$  — эффективное напряжение на индукторе,  $\cos \varphi$  — коэффициент мощности,  $\eta$  — КПД нагрева,  $R_u$  — электрическое сопротивление токам ВЧ в зоне нагрева.

Коэффициент мощности ВЧ-нагрева зависит от величины зазора  $h$  между поверхностью тела и индуктором, а также от электрических и магнитных свойств нагреваемого материала:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + (1 + \sqrt{2\mu_0 h} \sqrt{\frac{f}{\rho_\delta \times \mu}})^2}}. \quad (8)$$

Для соленоидального индуктора (рис. 1) увеличение зазора  $h$  от 1 до 10 мм на частотах от 400 до 2000 кГц вызывает снижение  $\cos \varphi$  для диамагнитных материалов почти в 10 раз, а для ферромагнетиков — в 3–4 раза. Поэтому для нагрева диамагнитных материалов необходимо максимально уменьшать величину зазора до значений, при которых возможно обеспечить нормальную работу индуктора.

КПД ВЧ-нагрева определяется соотношением электрических сопротивлений индуктора  $R_u$ , токоподводящих шин  $R_{ти}$  и материала детали в зоне нагрева  $R_\delta$ :

$$\eta = \frac{R_\delta}{R_\delta + R_u + R_{ти}}. \quad (9)$$

При расчетах  $R_u$  допускают, что ток ВЧ в индукторе протекает в слое глубиной  $\delta_u$ , а длина индуктора зависит от диаметра витка  $D_u$  и числа витков  $N$ :

$$R_u = \frac{ND_u \sqrt{\rho_u \mu_0 \times f}}{d_u}, \quad (10)$$

где  $d_u$  — диаметр трубки индуктора.

Подставив значения констант  $\delta_u$ ,  $\mu_0$  и приняв размерность частоты в МГц, получим:

$$R_u = 0,15ND_u \frac{\sqrt{f}}{d_u}, \quad (\text{МОм}). \quad (11)$$

При тех же допущениях сопротивление токоподводящих шин можно вычислить по формуле:

$$R_{ти} = 2L_{ти} \frac{\sqrt{\rho_u \mu_0 f}}{\pi \times d_u}. \quad (12)$$

Подставив значения констант, получим:

$$R_{ти} = 0,1L_{ти} \frac{\sqrt{f}}{d_u}, \quad (\text{МОм}). \quad (13)$$

Тогда КПД нагрева определим из выражения:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_u + R_{ти}}{R_\delta}} = \frac{1}{1 + \frac{(0,15ND_u + 0,1L_{ти}) \times \sqrt{f}}{R_\delta \times d_u}}. \quad (14)$$

Электрическое сопротивление токам ВЧ в зоне нагрева можно установить, предположив, что ширина зоны нагрева при малых величинах зазора  $h$  определяется проекцией диаметра индуктора, а длина — кольцом, окружность которого вычисляется по формуле  $\pi \times ND_\delta$ :

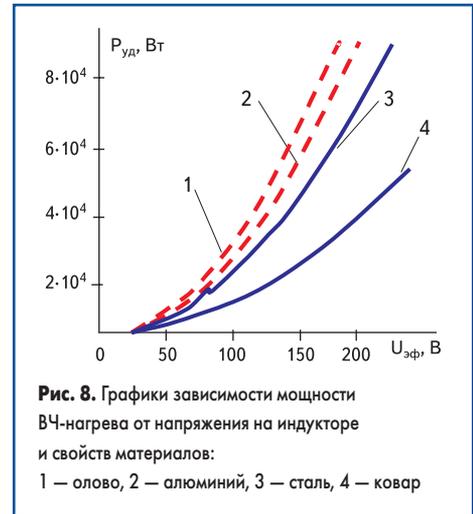
$$R_\delta = \frac{\pi ND_\delta}{d_{и}} \sqrt{\frac{\rho_\delta}{\mu_0 \rho f}}. \quad (15)$$

Электрическое сопротивление в зоне ВЧ-нагрева линейно снижается с уменьшением числа витков индуктора и диаметра детали. Максимальные значения КПД на уровне 0,9–0,95 достигаются для магнитных материалов при  $D_\delta \leq 0,01$  м.

Подставив выражения (8), (14), (15) в (7) и, сделав преобразования, получим итоговое выражение для эффективной мощности ВЧ-нагрева [10] (16).

Эффективное напряжение на индукторе зависит от типа ВЧ-генератора и составляет 50–500 В, при этом мощность нагрева изменяется от 1 до 100 кВт в зависимости от магнитных и электрических свойств материалов (рис. 8). Магнитные материалы при прочих равных условиях требуют меньшей удельной мощности. Общей закономерностью для всех магнитных материалов является нелинейное снижение мощности нагрева в зависимости от частоты токов ВЧ, что связано с проявлением поверхностного эффекта. Однако снижение частоты тока увеличивает электродинамический эффект перемешивания расплавленного припоя и повышает тем самым его растекаемость [11].

$$P_{эф} = \frac{U_{эф}^2}{\left( \sqrt{1 + (1 + \sqrt{2\mu_0 h} \sqrt{\frac{f}{\rho_\delta \mu}})^2} \right) \left( 1 + \frac{(0,15ND_u + 0,1L_{ти})f}{\pi ND_\delta} \sqrt{\frac{\rho \mu \mu_0}{\rho_\delta}} \right)}. \quad (16)$$



При пайке корпусных электронных устройств, чувствительных к электрической составляющей поля, выбор частоты осуществляют, учитывая условие [12]:

$$\delta < H/4, \quad (17)$$

где  $H$  — толщина стенки корпуса.

В этом случае напряженность поля внутри корпуса будет ослаблена в 100 раз по сравнению с поверхностью, что исключит деградацию электронных компонентов. Нижняя граница частотного диапазона с учетом (17) определится как

$$f_{\min} > 4 \times 10^6 \rho / \mu H^2. \quad (18)$$

Верхняя граница частотного диапазона выбирают исходя из максимального КПД нагрева.

Проверка полученных соотношений проведена для процессов ВЧ-пайки металлокерамических корпусов больших интегральных схем и микросборок [13, 14]. Температура в рабочей зоне нагрева измеряют пирометром. Напряженность ЭМ-поля в зазоре воспринималась рамкой и оценивалась вольтметром. Параметры ВЧ-нагрева контролировались на выходе генератора с помощью стандартных приборов.

Термические зависимости для пайки корпусов микросборок (рис. 9) показали влияние характера расположения витков в конструкции индуктора. Двухвитковый индуктор с витками в одной плоскости (3) имеет более пологий участок кривой нагрева, чем у одновиткового индуктора (1). Это создает более равномерный нагрев соединяемых элементов корпуса и способствует более полному заполнению припоем соединительного зазора при сравнительно коротком времени пайки. Применение магнитопровода из феррита (2) повышает эффективность нагрева в 1,6–1,7 раза, сокращая тем самым время пайки.

Анализ графиков зависимостей температуры в рабочей зоне индукционного устрой-

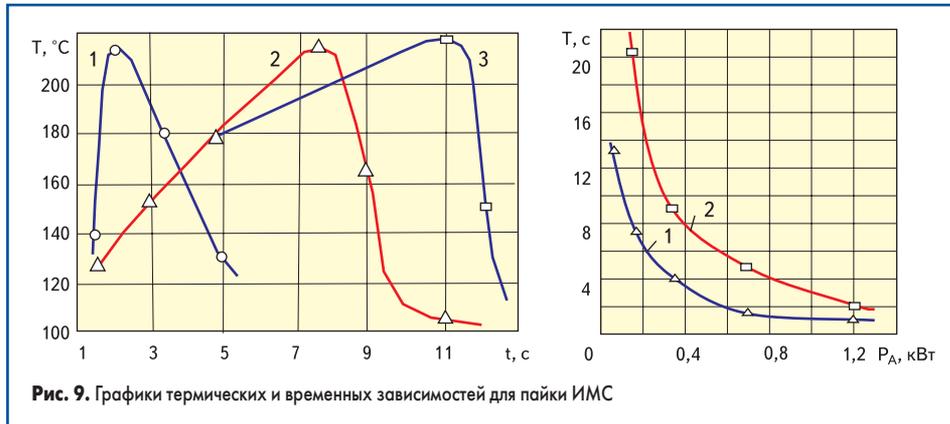


Рис. 9. Графики термических и временных зависимостей для пайки ИМС

ства на незамкнутом магнитопроводе от времени нагрева и коэффициента перекрытия зазора  $K_n$ , показал, что скорость нагрева составляет 50–60 °C/с при оптимальных режимах. При  $K_n > 1$  вследствие рассеяния тепла скорость нагрева падает до 30 °C/с.

Для повышения качества паяных соединений за счет увеличения площади растекания припоя и более полного заполнения им капиллярных зазоров в соединении с момента начала растекания припоя до окончания пайки паяемому изделию сообщают низкочастотные вибрации путем подачи переменного тока подмагничивания частотой 50–100 Гц и амплитудой 1–10 А в индуктирующую обмотку. Амплитуда вибраций деталей составляет 0,5–1,0 мм.

ВЧ-нагрев в диапазоне частот 1200–1500 кГц характеризуется большей зависимостью от величины мощности и электрофизических характеристик материалов. При мощности нагрева 1 кВт напряженность поля составляет

$4,5 \times 10^4$  А/м, а время пайки магнитных материалов — 5–7 с (рис. 9).

Оптимизация параметров ВЧ-нагрева позволила обеспечить высокую скорость нагрева в локальных зонах формирования паяных соединений и улучшить их качество за счет совместного действия поверхностного эффекта и пондеромоторных сил. Предпочтительно применение индукторов с магнитопроводами, так как у него более высокий КПД за счет снижения излучения в окружающее пространство.

#### Литература

1. Вологдин В. В., Куц Э. В., Асамов В. В. Индукционная пайка. Л.: Машиностроение. 1989.
2. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева. М.: АН СССР. 1958.
3. Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. М.: Энергия. 1965.
4. Curtis F. W. High-Frequency Induction Heating N.Y.: McGraw-Hill Book Comp. 1944.
5. Induction Heating. Industrial Applications/ Ed. by S. Lupi. Paris: U.I.E. 1992.
6. Простяков А. А. Индукционные нагревательные установки. М.: Энергия. 1970.
7. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия. 1974.
8. Benkowsky G. Grundlagen der Induktionserwärmung // Elektro-Praktiker. 1974. № 8.
9. Ланин В. Л. Пайка электронных сборок. Минск: НИЭИ Министерства экономики. 1999.
10. Ланин В. Л. Моделирование высокочастотного электромагнитного нагрева в процессах пайки электронных устройств // Известия Белорусской инженерной академии. 2002. № 2 (14)/2.
11. Ланин В. Л. Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии при пайке в электронике // Электронная обработка материалов. 2002. № 2.
12. Ланин В. Л. Высокочастотный электромагнитный нагрев в процессах пайки электронных устройств // Электронная обработка материалов. 2004. № 4.
13. Ланин В. Л., Тявловский М. Д. Особенности высокочастотного нагрева при герметизации пайкой корпусов БИС // Электронная техника. Сер. 7. 1980. № 3 (100).
14. Ланин В. Л., Черник А. А. Герметизация интегральных схем электромагнитным нагревом // Известия Белорусской инженерной академии. 2000. № 1 (9)/2.