

## **Выводы**

Таким образом, для повышения эффективности электрического разряда в технологиях разрушения высокопрочных формовочных или других высокопрочных материалов можно использовать нетоксичные ПАВ, относящиеся к классу диспергаторов, что даст возможность сократить время очистки отливок, снизить критические нагрузки на отливку, а главное, обеспечит высокую экологическую чистоту процесса разрушения. В настоящее время потребность в разработке активных рабочих сред для электрогидроимпульсных установок, широко используемых в литейном производстве, обусловлена технологическими принципами и требованиями к получению высокой чистоты поверхности отливок, снижению допусков на механическую обработку за счет использования высокопрочных формовочных и стержневых смесей. Результаты практического использования в технологических процессах разрушения будут представлены в следующих работах.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Амбрамзон А.А., Зайченко Л.П., Файнгольд С.И. Поверхностно-активные вещества. Синтез, анализ, свойства, применение: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.А. Амбрамзона. Л., 1988.
2. Амбрамзон А.А., Амбрамзон А.А., Бочаров В.В., Гаевой Г.М. и др. Поверхностно-активные вещества: Справочник / Под ред. А.А. Амбрамзона и Г.М. Гаевого. Л., 1979.
3. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностно-активные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. М., 1978.
4. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М., 1975.

*Поступила 27.02.04*

## **Summary**

Application of surface-active substances, which belong to the class of dispersants, in the time of electrical hydro pulse cleaning of thin-wall castings from high strength and core molding mixtures is shown. It enables to reduce the cleaning time, to decrease the critical load on cast material and to provide the high ecologies cleanness of banishing casting operations. For scientists and engineers developing electrical discharge technologies.

---

В.Л. Ланин

## **ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ НАГРЕВ В ПРОЦЕССАХ ПАЙКИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

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

Воздействие энергии высокочастотных (ВЧ) электромагнитных колебаний позволяет осуществлять высокопроизводительный бесконтактный нагрев при пайке деталей и припоя с помощью наведенных в них вихревых токов, а также активировать припой и улучшить его растекание по паяным поверхностям. Качество паяных соединений зависит от следующих факторов ВЧ нагрева: времени, скорости, площади зоны нагрева, плотности мощности и др. [1]. Эффективность нагрева определяется электрофизическими свойствами материалов деталей, частотой тока и конструктивными параметрами индукционных устройств. Вследствие поверхностного эффекта тепловая энергия локализуется в тонком слое, толщина которого определяется глубиной проникновения токов ВЧ. Пайка электронных устройств характеризуется невысокой удельной мощностью нагрева, малыми габаритами деталей, подвергаемых пайке, чувствительностью электронных устройств к электромагнитным наводкам. Поэтому для оптимизации параметров ВЧ нагрева в процессах пайки электронных устройств необходимы аналитические зависимости для вычисления эффективной мощности, выделяемой в зоне нагрева и КПД нагрева.

Эффективная мощность ВЧ нагрева в общем случае определяется согласно выражению [2]:

$$P_{эф} = \frac{U_{эф}^2 \cos \varphi \eta}{R_H}, \quad (1)$$

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

Для оптимизации пайки соединений различного типа необходимо получить выражения для  $\cos \varphi$  и  $\eta$ . Коэффициент мощности ВЧ нагрева зависит от величины зазора  $h$  между поверхностью детали и индуктором, а также от глубины проникновения  $\delta$  токов ВЧ и магнитной проницаемости  $\mu$  материала

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(1 + \sqrt{2} \frac{h}{\delta \mu}\right)^2}}. \quad (2)$$

Учитывая, что

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu \cdot f}}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала,  $f$  – частота тока, а  $\mu_0$  – магнитная постоянная, получим

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(1 + \sqrt{2\mu_0} h \sqrt{\frac{f}{\rho_d \mu}}\right)^2}}. \quad (4)$$

В процессах пайки соединений телескопического типа используют схему ВЧ нагрева с индуктором кольцевого типа (рис. 1). При увеличении зазора  $h$  от 1 до 10 мм на частотах от 400 до 2000 кГц коэффициент мощности для диамагнетиков падает почти в 10 раз, а для ферромагнетиков – в 3–4 раза (рис. 2). Поэтому для нагрева диамагнитных материалов необходимо уменьшить величину зазора для значений, обеспечивающих нормальную работу индуктора.

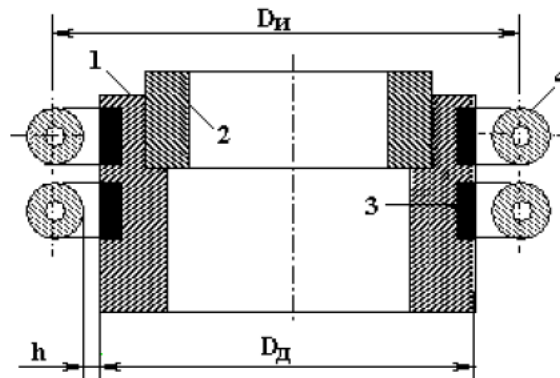


Рис. 1. Схема нагрева при ВЧ пайке: 1, 2 – детали, 3 – зона нагрева, 4 – индуктор

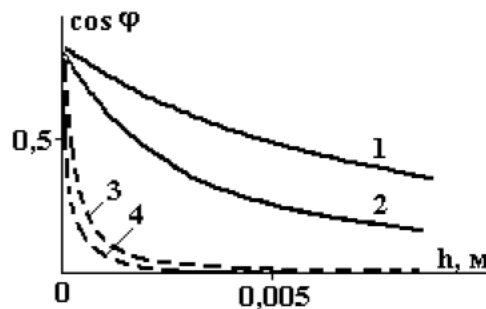


Рис. 2. Зависимости коэффициента мощности от величины зазора  $h$  и магнитных свойств материалов: 1 – ковар, 2 – сталь, 3 – олово, 4 – алюминий

КПД ВЧ нагрева определяется соотношением электрических сопротивлений индуктора  $R_H$  и материала детали в зоне нагрева  $R_d$  [3]

$$\eta = \frac{R_d}{R_d + R_n} = \frac{1}{1 + R_n / R_d}. \quad (5)$$

В индукционных устройствах ВЧ нагрева деталей небольших размеров необходимо в формуле (5) учитывать также активное сопротивление токоподвода  $R_{ТИ}$ , соединяющего индуктор с генератором и которое по величине сравнимо с  $R_n$ .

При определении  $R_n$  допускаем, что ток ВЧ в индукторе протекает в основном в слое глубиной  $\delta_n$ , а длина индуктора зависит от диаметра витка  $D_n$  и числа витков  $N$

$$R_n = \frac{ND_n \sqrt{\rho_n \mu_0 f}}{d_n}, \quad (6)$$

где  $d_n$  – диаметр трубки индуктора.

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

$$R_n = 0,15ND_n \frac{\sqrt{f}}{d_n}, \text{ мОм.} \quad (7)$$

При тех же допущениях сопротивление токоподвода

$$R_{ТИ} = 2\rho_n \frac{L_{ТИ}}{\pi \cdot d_n \delta_n}. \quad (8)$$

С учетом выражения (3) получим

$$R_{ТИ} = 2L_{ТИ} \frac{\sqrt{\rho_n \mu_0 f}}{\pi \cdot d_n}. \quad (9)$$

Подставив значения констант,

$$R_{ТИ} = 0,1L_{ТИ} \frac{\sqrt{f}}{d_n}, \text{ мОм.} \quad (10)$$

Тогда КПД нагрева определяется выражением

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_n + R_{ТИ}}{R_d}} = \frac{1}{1 + \frac{(0,15ND_n + 0,1L_{ТИ}) \cdot \sqrt{f}}{R_d \cdot d_n}}. \quad (11)$$

Электрическое сопротивление токам ВЧ в зоне нагрева можно определить из предположения, что ширина зоны нагрева при малых зазорах  $h$  определяется проекцией диаметра индуктора, а длина зоны – кольцом длиной  $\pi \cdot ND_d$  (рис. 1)

$$R_d = \frac{\rho_d N \pi D_d}{d_n \delta}. \quad (12)$$

С учетом выражения (3) получим

$$R_d = \frac{\pi ND_d}{d_n} \sqrt{\frac{\rho_d}{\mu_0 \rho f}}. \quad (13)$$

Электрическое сопротивление в зоне ВЧ нагрева линейно снижается с уменьшением числа витков индуктора, диаметра детали. Максимальные значения КПД на уровне 0,9 – 0,95 достигаются для магнитных материалов при  $D_d \leq 0,01$  м (рис. 3).

Подставим выражения (4), (11), (13) в (1) и, сделав преобразования, получим итоговое выражение для эффективной мощности ВЧ нагрева

$$P_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{эф}}^2}{\left( \sqrt{1 + \left( 1 + \sqrt{2\mu_0 h} \sqrt{\frac{f}{\rho_d \mu}} \right)^2} \right) \left( 1 + \frac{(0,15ND_n + 0,1L_{ТИ})f}{\pi ND_d} \sqrt{\frac{\rho_n \mu_0}{\rho_d}} \right)}. \quad (14)$$

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. 4). 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 тем самым повышает его растекаемость.

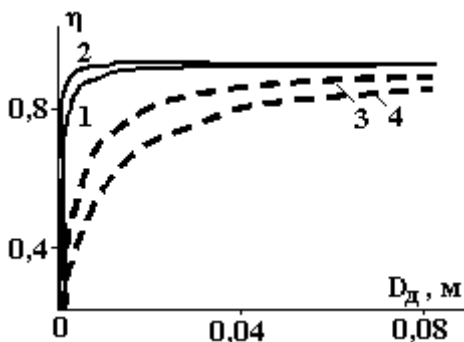


Рис. 3. Зависимости КПД ВЧ нагрева от диаметра детали и свойств материалов: 1 – ковар, 2 – сталь, 3 – олово, 4 – алюминий

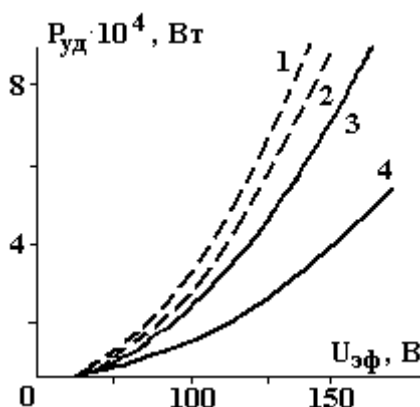


Рис. 4. Зависимости мощности ВЧ нагрева от напряжения на индукторе и свойств материалов: 1 – олово, 2 – алюминий, 3 – сталь, 4 – ковар

При пайке корпусных электронных устройств, чувствительных к электрической составляющей поля, выбор частоты необходимо осуществлять из условия [4]

$$\delta < H/4, \quad (15)$$

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 соотношения (15) определится как

$$f_{\min} > 4 \cdot 10^6 \rho / \mu H^2. \quad (16)$$

Верхняя граница частотного диапазона выбирается исходя из максимального КПД нагрева.

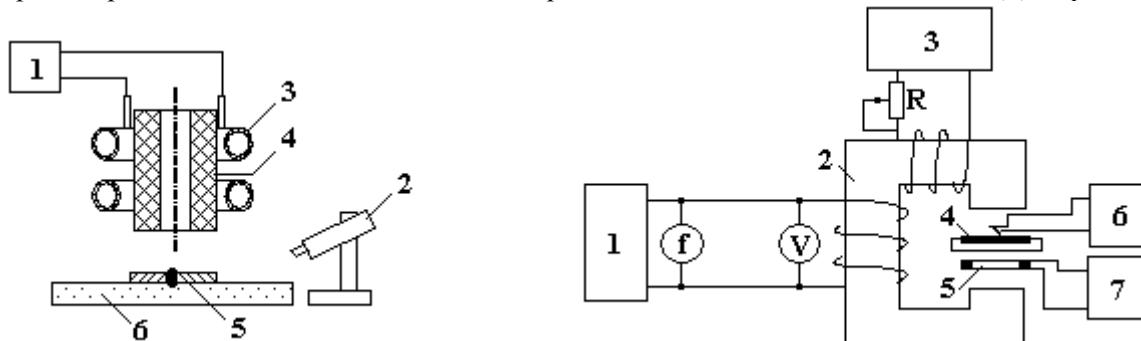


Рис. 5. Схема нагрева круговым индуктором: 1 – генератор, 2 – пирометр, 3 – индуктор, 4 – вода магнитный сердечник, 5 – детали, 6 – термоизолятор

Исследования проведены для двух типов индукционных устройств: кругового (рис. 5) и на незамкнутом магнитопроводе (рис. 6). Первое устройство содержало круговой индуктор с цилиндрическим магнитным сердечником, ВЧ генератор, пирометр. Во втором устройстве генератор 1 подключался к обмотке индуктора с магнитопроводом 2 из ферромагнитного материала. В зазоре магнитопровода нагревались детали 4. Обмотка подмагничивания постоянным током подключена к входу регулирующего выпрямителя 3. Температура в рабочей зоне измерялась термопарой и регистрировалась прибором 6. Напряженность ЭМ поля в зазоре воспринималась рамкой и оценивалась прибором 7. Параметры ЭМ поля контролировались на выходе генератора с помощью стандартных приборов. Величина тока подмагничивания варьировалась переменным резистором R.

Зависимости напряженности ЭМ поля от анодного напряжения носят нелинейный характер (рис. 7). Для второго типа индуктора напряженность поля в 4,5 раза выше ввиду концентрации магнитного поля.

Термические зависимости для пайки корпусов интегральных схем (рис. 8) показали влияние конструкции индуктора кругового типа. Двухвитковый индуктор с витками в одной плоскости 3 имеет более пологий участок кривой нагрева, чем у одновиткового индуктора 2. Это создает более равномерный нагрев деталей, соединяемых пайкой, способствует более полному заполнению припоем зазора между соединяемыми деталями при сравнительно небольшом времени пайки – не свыше 10 с. Применение магнитопровода из феррита 1 повышает эффективность нагрева в 1,6 – 1,7 раза, сокращая тем самым время пайки.

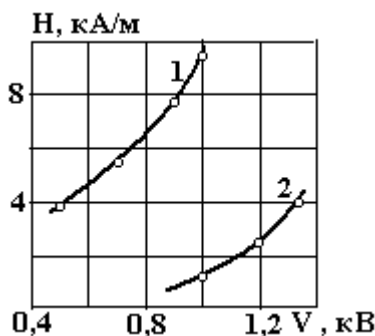


Рис. 7. Зависимости напряженности ЭМ поля от анодного напряжения

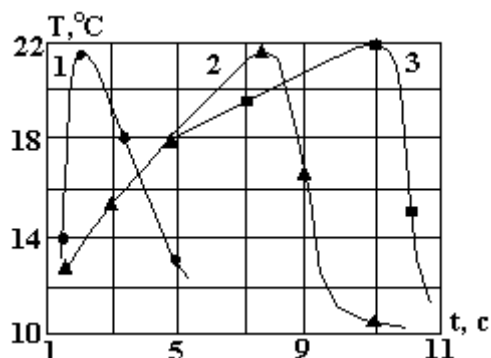


Рис. 8. Термические зависимости в зоне пайки интегральной микросхемы (пояснения в тексте)

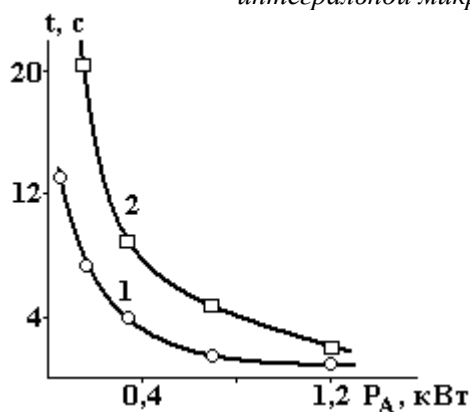


Рис. 9. Зависимости времени пайки от мощности ВЧ нагрева  
1 – диамагнитные материалы, 2 – магнитные материалы

Анализ зависимостей температуры в рабочей зоне устройства на незамкнутом магнитопроводе от времени нагрева и коэффициента перекрытия зазора  $K_n$  показал, что на первом этапе нагрева (до 10 с) скорость нагрева составляла  $60\text{ }^\circ\text{C/s}$ , в дальнейшем скорость уменьшилась до  $20\text{ }^\circ\text{C/s}$ , что объясняется увеличением потерь энергии в окружающую среду за счет излучения. При  $K_n > 1$  рассеяние тепла происходит с большей скоростью. Материалы с низкой электропроводностью при оптимальном перекрытии зазора испытывают нагрев со скоростью до  $30\text{ }^\circ\text{C/s}$ . Напряженность электромагнитного поля в зазоре на низких частотах 20 – 60 кГц составляла  $(2,0 - 2,5) \cdot 10^4\text{ А/м}$ .

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 процесса изделия, подвергаемому пайке, сообщали низкочастотные вибрации

путем подачи переменного тока подмагничивания частотой 50 – 400 Гц и амплитудой 1 – 10 А в индуктирующую обмотку. Амплитуда вибраций деталей составляла 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  $4,5 \cdot 10^4$  А/м, а время пайки магнитных материалов – 5 с (рис. 9).

Оптимизация параметров ВЧ нагрева позволила обеспечить его высокую скорость в локальных зонах формирования паяных соединений и улучшить их качество за счет совместного действия поверхностного эффекта и пондеромоторных сил. Предпочтительным является индуктор на магнитопроводе, так как у него более высокий КПД за счет снижения излучения в окружающее пространство.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Thwaites C.J.* Soldering technology – a decade of developments // *Int. Metals. Rev.* 1984. V. 29. № 2. P. 45–74.
2. *Benkowsky G.* Grundlagen der Induktionserwärmung // *Elektro-Praktiker.* 1974. Bd 28. № 8. S. 265–268.
3. *Вологдин В.В., Куц Э.В., Асамов В.В.* Индукционная пайка. Л., 1989.
4. *Ланин В.Л., Хмыль А.А.* Современные процессы пайки в производстве РЭА. Минск, 1988.
5. *Ланин В.Л., Тявловский М.Д.* Особенности высокочастотного нагрева при герметизации пайкой корпусов БИС // *Электронная техника. Сер. 7.* 1980. № 3(100). С.11 – 14.
6. *Ланин В.Л., Черник А.А.* Герметизация интегральных схем электромагнитным нагревом // *Известия Белорусской инженерной академии.* 2000. № 1(9)/2. С. 132 – 133.
7. *Ланин В.Л.* Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии при пайке в электронике // *Электронная обработка материалов.* 2002. № 2. С. 17 – 20.
8. *Ланин В.Л.* Моделирование высокочастотного электромагнитного нагрева в процессах пайки электронных устройств // *Известия Белорусской инженерной академии.* 2002. № 2(14)/2. С. 167 – 169.

*Поступила 28.11.03*

#### Summary

The parameters of a high-frequency heating for inductive systems of a circle type and an open-ended magnetic circuit are optimized. The frequency band for the soldering of the packed electronic systems is determined. The quality of connections is improved due to the combined action of a skin effect and ponderomotive forces.

---

А.М. Гашимов, К.Б. Гурбанов, Р.Н. Мехтизаде, А.М. Гасанов

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД КОЖЕВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

*Институт физики НАН Азербайджанской Республики,  
проспект Г. Джавида, 33, АЗ-1143, Баку, Азербайджан*

Сточные воды предприятий кожевенного и овчинно-мехового производств относятся к многокомпонентным системам и характеризуются содержанием высоких концентраций различного рода органических и неорганических веществ, которые достаточно сильно загрязняют водные ресурсы. Сточные воды этих предприятий представляют собой сложную смесь различных химических веществ и отходов производства, которые определяются ассортиментом используемых в технологических процессах реагентов.

Технологический процесс обработки кожи заключается в последовательном выполнении следующих операций: отмоки и золениа, мездрения сырья и голья, обеззоливания, мягчения, пикекелевания, дубления, красильно-жировальных процессов, нейтрализации, наполнения, сушильно-увлаж-