

Бесконтактные вибрации в процессах высокочастотного электромагнитного нагрева

Проблема повышения надежности электронных устройств решается в настоящее время путем разработки новых высокоэффективных технологических процессов, характеризующихся высокой производительностью, низкой энергоемкостью, экологической чистотой, обеспечивающих высокое качество изготавливаемых изделий. Для формирования качественных паяных соединений в изделиях электроники предложено сочетать нагрев энергией электромагнитного поля с возбуждением вибраций в расплаве припоя.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.unibel.by

Пондеромоторные силы в электромагнитном поле

Перспективы научных исследований в области активированных процессов связаны с применением совместных методов воздействия энергии полей различной физической природы, например, высокочастотного (ВЧ) электромагнитного нагрева и ультразвукового (УЗ) поля, вибраций в расплаве и т. д., что позволит использовать физические эффекты взаимодействия полей, реализовать прецизионность и регулируемость нагрева, создать программно-управляемое оборудование. Излучение в форме концентрированных потоков энергии вводится в зону формирования соединений контактным способом, например, УЗ-колебания, либо бесконтактным: ЭМ-волной, инфракрасным излучением, лазерным лучом и т. д.

Воздействие мощного ЭМ-поля на расплавленный припой вызывает его интенсивное перемешивание за счет вихревых токов и пондеромоторных сил, что улучшает смачивание и растекание припоя [1]. При воздействии ЭМ-поля на расплавы в индукционных тигельных печах возникает эффект переме-

шивания металла, так как расплавленный металл испытывает радиальное давление (сжатие), вызванное взаимодействием токов индуктора и расплава металла. Под влиянием этого давления происходит подъем уровня металла на высоту h по отношению к уровню краев (создается мениск), расплавленный металл стекает вдоль поверхности мениска и тигля и поднимается снова вдоль массы металла (рис. 1).

Величина электромагнитного давления на расплав $F_{эм}$ выражается формулой:

$$F_{эм} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{4}, \quad (1)$$

где μ — магнитная проницаемость, μ_0 — магнитная постоянная, H — амплитуда напряженности магнитного поля.

Удельная мощность высокочастотного нагрева зависит от электрофизических характеристик материала и частоты тока f :

$$P_{y\partial} = kH^2 \sqrt{\rho\mu f}, \quad (2)$$

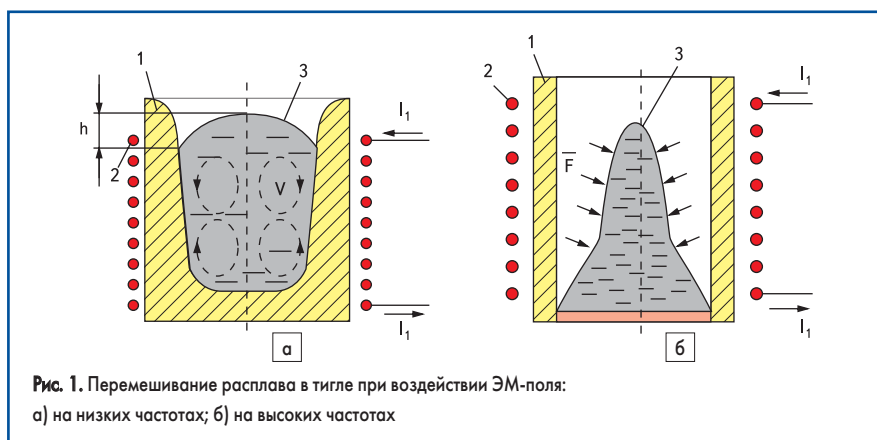
где k — размерный коэффициент, ρ — удельное электрическое сопротивление.

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что при одной и той же удельной мощности нагрева понижение частоты сопровождается увеличением напряженности магнитного поля и большим электромагнитным давлением на расплав. Высота подъема расплава металла определяется [2]:

$$h = \frac{F_{эм}}{\gamma} \times 10^3 = \frac{2\pi}{9,81\gamma} H^2 \times 10^4 = \frac{P_{y\partial}}{9,81\gamma} \sqrt{\frac{10}{\rho f}}, \quad (3)$$

где γ — удельный вес металла, $P_{y\partial}$ — удельная мощность, передаваемая в металл.

Расчеты показывают, что при удельной мощности нагрева, равной 10^6 Вт/м², высота подъема расплава металла зависит от частоты тока. Понижение частоты до 66 кГц увеличивает интенсивность элект-



ромагнитного перемешивания, а ее увеличение — уменьшает. Совместное действие ВЧ-поля и электродинамических сил улучшает смачивание и растекание припоя при формировании соединений [3].

ВЧ-нагрев в вакууме в сочетании с воздействием УЗ-полем позволяет получать вакуумно-плотные паяные соединения деталей из нержавеющей и высокотемпературных сталей. При ВЧ-пайке телескопических соединений в одном из элементов возбуждают УЗ крутильные колебания с помощью двух акустических волноводов [4]. Недостатком такого способа является сложность конструкции установки, работающей в условиях вакуума.

Для увеличения площади растекания припоя предложено воздействовать на него пондеромоторными силами в процессе ВЧ-нагрева. Для этого в зоне нагрева образуют электрически замкнутый контур, в котором наводят вихревые токи той же частоты, что и в индукторе [5]. Сила, возникающая при взаимодействии ЭМ-поля и вихревого тока I в проводнике длиной l , имеет направленное действие (рис. 2) и определяется по формуле:

$$\vec{F} = \vec{B} \vec{I} l, \quad (4)$$

где

$$B = \frac{U_m}{4,44 S_C f w}, \quad (5)$$

где U_m — амплитуда напряжения, S — площадь магнитопровода, w — число витков.

Для увеличения коэффициента растекания припоя необходимо, чтобы давление $P_{эм}$, создаваемое на расплав припоя силой F , превосходило давление сил поверхностного натяжения припоя:

$$\frac{P_{эм}}{P_s} = \frac{B I l}{\sigma \pi D}. \quad (6)$$

Действие пондеромоторной силы \vec{F} на поверхность расплава на границе с твердым телом создает поверхностное натяжение $\sigma_{эм}$:

$$\vec{B} \vec{I} l = 2 \sigma_{эм} \times l. \quad (7)$$

Поверхностное натяжение, вызванное действием пондеромоторных сил, вносит изменения в равновесие сил поверхностного натяжения на межфазных границах:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} + \sigma_{эм} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}. \quad (8)$$

Отношение коэффициентов растекания припоя в ЭМ-поле и без него имеет вид:

$$\frac{K_p}{K_{p0}} = 1 + \frac{\sigma_{эм}}{(1 + \cos \theta) \sigma_{1,2}}. \quad (9)$$

Моделирование роста коэффициента растекания припоя под действием пондеромоторных сил при следующих граничных условиях: при полной смачиваемости припоем $\cos \theta = 1$; $\sigma_{1,2} = 0,5$ Н/м; $B = 0,4-0,8$ Тл, величине индуцированного тока в пределах от 0 до 10 А, $B = 0,4-0,8$ Тл, $I = 2,5-10$ А показало, что величина роста линейно зависит как от напряжен-

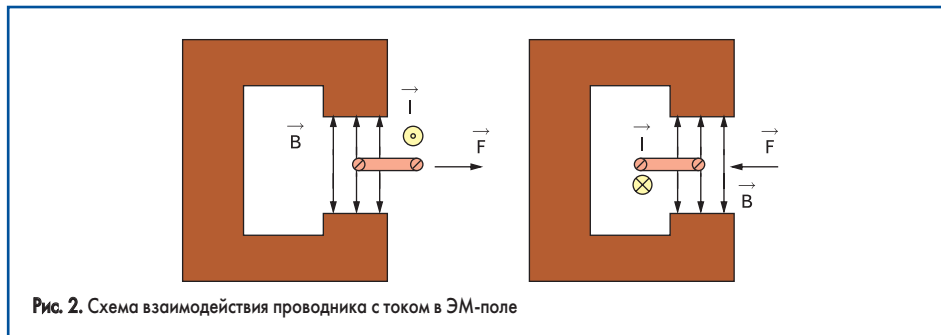


Рис. 2. Схема взаимодействия проводника с током в ЭМ-поле

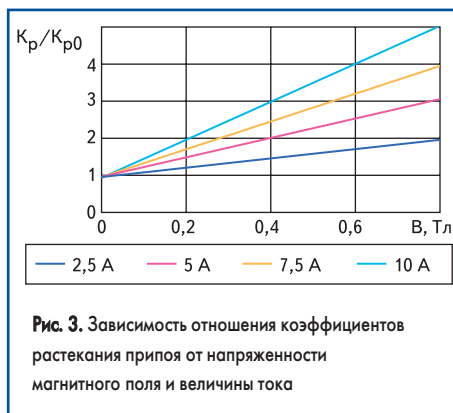


Рис. 3. Зависимость отношения коэффициентов растекания припоя от напряженности магнитного поля и величины тока

ности поля, так и от величины тока, индуцированного в припое (рис. 3). При токе до 5 А и индукции 0,4 Тл коэффициент растекания припоя за счет сил ЭМ давления может возрасти в 2 раза.

Для повышения качества паяных соединений за счет увеличения площади растекания припоя и более полного заполнения им капиллярных зазоров в соединении, предложено сочетать нагрев изделий и припоя энергией ЭМ-поля в зазоре магнитопровода индуктора с воздействием механических вибраций. С момента расплавления припоя до завершения его растекания паяемому изделию сообщают низкочастотные вибрации подачи переменного тока подмагничивания частотой 50–400 Гц и амплитудой 1–10 А в индуктирующую обмотку. Амплитуда вибраций пропорциональна величине тока подмагничивания, магнитной проницаемости материала и составляет 0,5–5,0 мм. Направление вибраций деталей устанавливаются таким образом, чтобы они совпадали с направлением вектора средней скорости течения припоя в паяемый зазор, что достигается со-

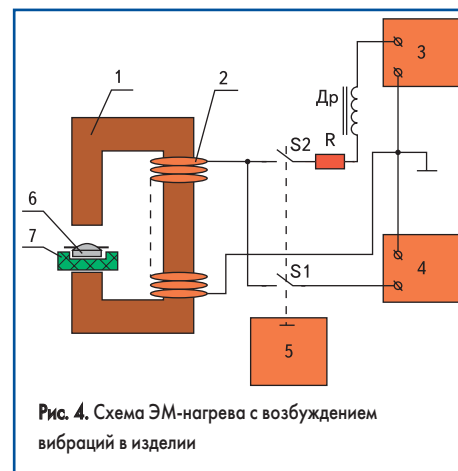


Рис. 4. Схема ЭМ-нагрева с возбуждением вибраций в изделии

ответствующей ориентацией изделия в магнитопроводе индуктора.

Устройство (рис. 4) содержало магнитопровод 1 с индуктирующей обмоткой 2, источник тока НЧ 3, генератор 4, пульт управления 5. Паяемые детали 6 размещали с помощью диэлектрической кассеты 7 в зазоре магнитопровода. Дроссель Dr и резистор R обеспечивали электрическую развязку цепей средней и низкой частот. Пульт управления коммутировал генератор 3 и источник 4 к обмотке с помощью переключателей $S1$ и $S2$. Нагрев в зазоре магнитопровода осуществляли при замкнутом переключателе $S1$ путем подачи электрических колебаний от генератора 4 в индуктирующую обмотку 2.

Совместная активация процесса пайки энергией ЭМ-поля и вибрациями обеспечила увеличение скорости растекания оловянно-свинцовых припоев до 1,5 раза по поверхности паяемых деталей в присутствии неактивированных спиртоканифольных флюсов.

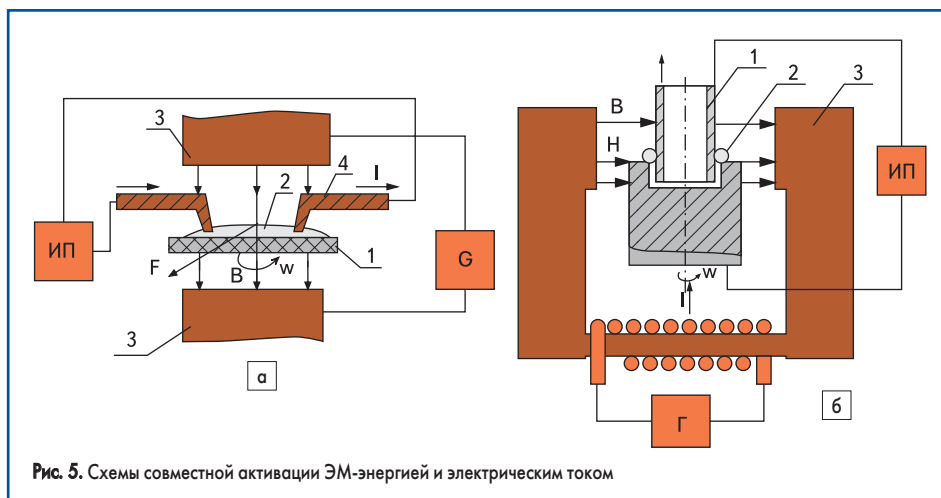


Рис. 5. Схемы совместной активации ЭМ-энергией и электрическим током

Пондеромоторные силы в расплаве припоя возбуждали с помощью устройства (рис. 5а), состоящего из генератора G и источника импульсов тока ИП. Изделие 1 и припой 2 в форме дозированной заготовки нагревали энергией ЭМ-поля в зазоре магнитопровода 3 и пропускали импульсы электрического тока через расплав припоя с помощью токовыводов 4 в направлении, перпендикулярном вектору индукции магнитного поля, с одновременным вращением изделий вокруг собственной оси с частотой ω [6]. Возникающие пондеромоторные силы действуют в расплаве припоя в направлении, перпендикулярном вектору электрического тока, а вращение изделия обеспечивает равномерное растекание припоя.

Для телескопических соединений схема устройства (рис. 5б) отличалась лишь конструкцией токовыводов. Соединяемые детали 1 и припой 2 в форме кольца располагали в зазоре магнитопровода 3 с обмоткой 4. Детали подключали к источнику тока, который протекал через расплав после расплавления кольца припоя и затекания его в зазор между деталями. Пондеромоторные силы, действуя в плоскости изделия в направлении, перпендикулярном вектору электрического тока, обеспечивали увеличение глубины проникновения припоя в капиллярный зазор, а вращение деталей вокруг оси создавало условие для равномерного заполнения припоем соединительного зазора. Для эффективного принудительного растекания расплава припоя необходимо, чтобы пондеромоторная сила превышала силу поверхностного натяжения на границе твердое тело/расплав припоя, что выполнялось при напряженности переменного магнитного поля более 0,5 Тл и величине постоянного электрического тока более 1 А.

Вращение изделия вокруг оси создавало пондеромоторное натяжение $\sigma_n = F/L$, где L — длина окружности расплава припоя, которая растягивала дозированную навеску припоя равномерно по поверхности изделия. Скорость вращения изделия зависела от времени пайки и выбиралась такой, чтобы изделие совершало 2–3 оборота за время пайки.

Для повышения качества паяных соединений и улучшения смачивания паяемых поверхностей ВЧ-колебания в диапазоне 100–1000 кГц модулируют УЗ-сигналом частотой 16–66 кГц от УЗ-генератора с глубиной модуляции 20–100%. Модулированные ВЧ-колебания создают в припое силу электромагнитного давления F , величина которого пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля H :

$$F = \frac{\kappa H^2}{\sqrt{\rho \times f}}. \quad (10)$$

С помощью ферромагнитного сердечника внутри индуктора концентрируют переменное магнитное поле в зоне пайки до напряженности 30–50 А/м и создают ЭМ-давление в припое до 10^4 Вт/м². Переменное давление УЗ-частоты вызывает развитие кавитационных явлений и микропотоков в припое и интенсифицирует процесс смачивания паяемых

поверхностей. При ВЧ-пайке электронно-вакуумных приборов в вакууме 10^{-4} Торр припоем ПСрМИн-63В при температуре 800 °С в течение 10–20 с глубина УЗ-модуляции величиной 80% обеспечивала непрерывный паяный шов. Увеличение глубины модуляции до 100% повысило коэффициент растекания припоя в 2 раза.

Модуляция ВЧ-напряжения сигналом частотой 0,05–100 кГц при глубине модуляции 60–100% вызывает в паяемых деталях низкочастотные вибрации амплитудой:

$$A = \frac{\kappa P_{\kappa} m}{100 \sqrt{\rho \times f}}, \quad (11)$$

где P_{κ} — колебательная мощность ВЧ-генератора, m — глубина модуляции.

При пайке рамки корпуса микросборки из титанового сплава ВТ-5 к керамической плате с толстопленочной металлизацией ВЧ-колебания модулировались частотой 250 Гц и амплитудой 150 В от генератора НЧ в течение 5 с при глубине модуляции 60–100%.

Таблица. Зависимость качества паяного шва от глубины модуляции

Частота сигнала модуляции, кГц	Время пайки, с при глубине модуляции, %				Качество паяного шва
	10	30	60	100	
0,05	7,5	7,0	6,5	6,8	Удовлетворительное
0,1	7,0	6,3	5,5	5,0	
1,0	7,5	7,2	6,0	6,5	Хорошее
10,0	8,5	8,0	7,5	7,5	
50,0	10,5	10,0	8,5	8,0	Удовлетворительное

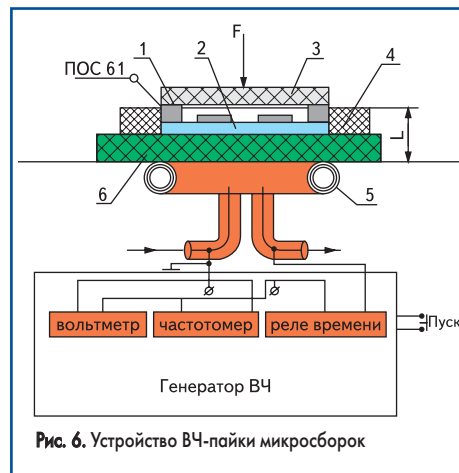


Рис. 6. Устройство ВЧ-пайки микросборок

Качество соединений оценивалось в зависимости от частоты сигнала и глубины модуляции (таблица). Сокращение времени пайки и повышение качества соединений достигнуто при частотах модуляции от 0,1 до 10 кГц.

Для пайки рамки 1 к плате микросборки 2 разработано устройство (рис. 6), содержащее прижим 3, катушку 4, индуктор 5, теплоизолирующую плату 6. Расположение индуктора под платой исключает случайное прикосновение к нему в процессе пайки, перемещение катушки может быть автоматизировано с помощью транспортного устройства [7].

Нижнее расположение индуктора отличается более пологой характеристикой нагрева, что исключает перегрев БИС, а также прикосновение к индуктору, что повышает безопасность в работе.

Колебания паяемой детали амплитудой 0,1–1,0 мм с момента расплавления припоя и в течение времени пайки 3–10 с приводят к разрушению окисных пленок на припое и улучшению процесса смачивания припоем паяемых поверхностей. Таким образом, реализован бесконтактный ввод УЗ-колебаний при ВЧ-нагреве, что способствует формированию качественных паяных соединений за счет полного заполнения швов в соединениях.

Для увеличения коэффициента растекания припоя по паяемым поверхностям необходимо, чтобы возникающие в припое пондеромоторные силы превышали силы трения припоя при его движении в зазоре:

$$F_{\text{эм}} > \eta \times S \times A \times \omega / h, \quad (12)$$

где η — динамическая вязкость расплава, S — площадь контакта, A — амплитуда колебаний, ω — круговая частота, h — величина зазора.

С учетом выражения (4) оптимальная частота вибраций в припое составляет:

$$f = B \times I \times l / 2\pi \times \eta \times S A. \quad (13)$$

Граничные условия для моделирования зависимости частоты вибраций взяты для варианта монтажа силовых IGBT-транзисторов с использованием припойной композиции [4]: $\eta = 0,8$ Па·с, $h = 0,5$ мм, амплитуда вибраций 150–250 мкм, площадь кристаллов $S = 1,0$ –16,0 мм², $B = 0,5$ –1,5 Тл, $I = 5$ –10 А (рис. 7).

Анализ зависимостей показывает, что с увеличением размеров кристаллов частота виб-

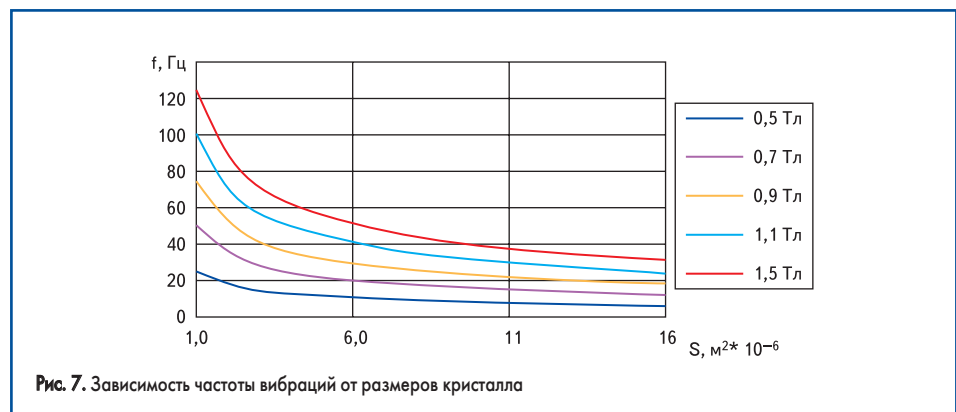


Рис. 7. Зависимость частоты вибраций от размеров кристалла

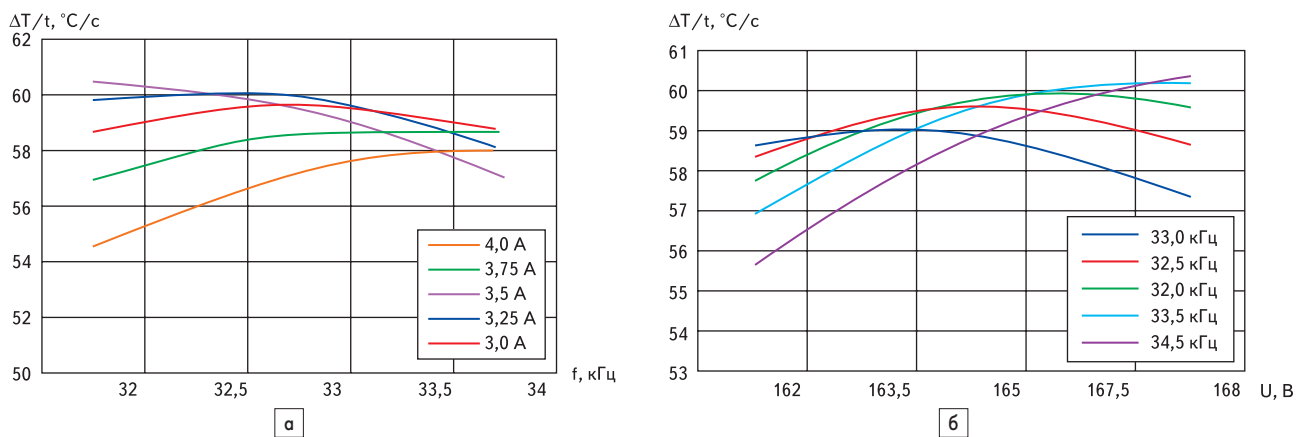


Рис. 8. Зависимость скорости нагрева от частоты (а) и напряжения (б) при различных значениях факторов в сечениях от -1,0 до 1,0: а) $U = 165$ В; б) $I_n = 3,5$ А

раций нелинейно снижается. Для размеров кристалла 4 мм² и напряженности поля до 1 Тл частота вибраций составляет 25–50 Гц.

Моделирование и оптимизация параметров ВЧ вибрационной пайки

Оптимальное решение задач повышения конкурентоспособности изделий, снижения потребления материалов и топливно-энергетических ресурсов возможно лишь при автоматизированном управлении технологическим процессом, основанном на получении математических моделей многофакторного процесса и оптимизации параметров процесса.

На первом этапе моделирования параметров процесса ВЧ вибрационной пайки был поставлен полный факторный эксперимент (ПФЭ) для получения модели с варьированием факторов на двух уровнях вида 2³. В качестве параметра оптимизации выбрана скорость нагрева, поскольку она является одним из важнейших параметров. Исследуемые параметры процесса: частота, амплитуда напряжения на выходе генератора и амплитуда тока подмагничивания. Частота колебаний контролировалась на выходе УЗ-генератора электронным частотомером ЧЗ-67 с точностью 0,1 кГц, амплитуда напряжения и тока — универсальным цифровым вольтметром В7-73/1, время пайки — таймером с точностью 0,1 с, температура припоя — измерителем температуры Щ-4540 с точностью 1 °С [8].

Модель процесса ВЧ вибрационной пайки имеет вид:

$$Y = 23,65 + 17,95\bar{X}_1 - 3,7\bar{X}_2 - 3,8\bar{X}_3 - 2,62\bar{X}_1\bar{X}_2 + 2,6\bar{X}_1\bar{X}_3. \quad (14)$$

Анализ модели показывает, что наибольшее влияние на скорость нагрева оказывает фактор X_1 (напряжение на выходе генератора), в то время как влияние факторов X_2 (частота тока) и X_3 (амплитуда тока подмагничивания) являются менее существенными.

В целях оптимизации параметров процесса, при которых целевая функция достигает экстремума, использован метод крутого восхождения (Бокса-Уилсона). Шаговое движение при этом осуществлялось в направлении наибольшего изменения целевой функции по гради-

енту до достижения частного экстремума. Для получения модели функции в «почти стационарной области» использован центральный композиционный ортогональный план (ЦКОП) второго порядка, включающий в себя добавление нескольких специально спланированных точек к матрице планирования ПФЭ. Центр ЦКОП выбран в точке, соответствующей оптимальным параметрам процесса, полученным при оптимизации параметров процесса монтажа ЭУ, методом крутого восхождения (Бокса-Уилсона). Координаты специально спланированных точек (0, α) и количество центральных точек выбирали так, чтобы план второго порядка оставался ортогональным.

В результате моделирования с помощью ЦКОП получено уравнение регрессии второго порядка, которое с учетом проверки коэффициентов полинома по критерию Стьюдента (при 5%-ном уровне значимости) приобрело вид:

$$Y = 36,0 + 1,21 \times X_1 - 1,01 \times X_2 - 0,98 \times X_3 - 1,83 \times X_1 \times X_2 - 2,05 \times X_1 \times X_3 + 1,12 \times X_2 \times X_3 - 1,29 \bar{X}_1^2 - 0,93 \bar{X}_2^2 - 1,10 \bar{X}_3^2. \quad (15)$$

Для наглядной интерпретации полученных результатов по уравнению регрессии построены сечения поверхностей отклика функции оптимизации — скорости нагрева (рис. 8). Анализ уравнения регрессии и поверхностей отклика позволяет сделать следующие выводы. При постоянных значениях напряжения и частоты увеличение тока подмагничивания ведет к увеличению скорости нагрева до некоторого оптимального значения. Увеличение частоты при постоянном напряжении повышает скорость нагрева при соответствующем уменьшении тока подмагничивания и снижает ее при увеличении тока подмагничивания, то есть процесс нагрева имеет определенный оптимум технологических параметров, при котором скорость максимальна. Варьируя сразу несколькими параметрами технологического процесса, можно добиться стабильного, заранее определенного значения скорости нагрева как наиболее важного для процесса пайки параметра [9].

Полученные зависимости достаточно хорошо согласуются с экспериментальными дан-

ными. Максимальная скорость нагрева — 60 °С/с достигнута на частоте 32,5 кГц при постоянном значении тока подмагничивания 3,5 А вне зависимости от частоты при постоянном напряжении на выходе генератора.

Таким образом, совместная активация процесса пайки энергией ЭМ-поля и вибрациями увеличивает растекание оловянно-свинцовых припоев до 1,5 раза по поверхности паяемых деталей и повышает качество соединений.

Литература

1. Вологдин В. В., Куц Э. В., Асамов В. В. Индукционная пайка. Л.: Машиностроение, 1989.
2. Induction Heating. Industrial Applications / Ed. by S. Lupi. Paris, U.I.E. 1992.
3. Интенсификация процессов формирования твердотельных структур концентрированными потоками энергии / Под общ. ред. А. П. Досанко, Н. К. Толочко. Минск: Бестпринт, 2005.
4. Шапошников О.А., Курдин Ю.А. Высокотемпературная индукционная пайка в электровакуумном приборостроении. М.: ЦНИИ «Электроника»б 1982.
5. Ланин В. Л. Высокочастотный электромагнитный нагрев для пайки электронных устройств // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 5.
6. Пат. 2686 Беларусь, МКИ В23К 1/06, 1/02, Н05В 6/02. Способ пайки изделий / В. Л. Ланин, И. Н. Чернышевич, В. М. Бондарик. № 1004. Заявлено 08.11.1993. Опубл. 20.10.98.
7. Ланин В. Л., Хмыль А. А. Автоматизация процессов пайки в радиоэлектронике // Материалы семинара «Автоматизация и внедрение прогрессивных процессов пайки в радиоэлектронике, приборостроении и машиностроении». Л.: ЛДНТП, 1990.
8. Ланин В. Л. Моделирование высокочастотного электромагнитного нагрева в процессах пайки электронных устройств // Известия Белорусской инженерной академии. 2002. № 2(14)/2.
9. Ланин В. Л. Эффективность нагрева концентрированными потоками энергии при пайке в электронике // Электронная обработка материалов. 2002. № 2.