В.Л. Ланин

РАСТЕКАНИЕ РАСПЛАВОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ И МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

Электронная обработка материалов, 2010, № 5. – С. 85–92.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул.П.Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь, vlanin@bsuir.by

Введение

Образование паяных соединений предполагает сближение взаимодействующих сред до расстояний межатомного взаимодействия, которое осуществляется на этапе смачивания расплавом припоя паяемой поверхности. Процесс смачивания основного металла расплавом состоит в замене межатомных связей, возникших между металлами в твердой фазе, на металлическую связь атомов на межфазной границе расплав–твердое тело. Растекание расплава по поверхности твердого тела происходит в результате взаимодействия сил поверхностного натяжения и сопровождается сближением жидкой и твердой фаз. Активация процессов растекания и смачивания достигается применением как механических низкочастотных и ультразвуковых колебаний, вводимых контактными методами в расплав [1], так и с помощью бесконтактных методов, использующих энергию электрических и магнитных полей.

Для управления площадью растекания припоя по поверхности твердого тела в постоянном магнитном поле, через проводящее тело пропускают электрический ток в направлении, перпендикулярном направлению внешнего магнитного поля (рис. 1). Возникающие в расплаве пондеромоторные силы в зависимости от направления действия увеличивают или ограничивают его растекание по поверхности твердого тела [2] . Процесс принудительного

растекания припоя в магнитных полях напряженностью 2000–10 000 Э при плотностях тока через твердое тело до 1 А/мм^2 сопровождается электромассопереносом через межфазную границу, что увеличивает адгезию расплава к подложке и снижает краевой угол смачивания. В данном способе электрический ток протекает в основном через проводящее твердое тело, а через припой в несколько раз меньше ввиду существенной разницы в проводимости материалов. Величина индукции внешнего поля постоянна и невелика, поэтому пондеромоторные силы малы и, кроме того, имеют строго определенное направление, определяемое по правилу левой руки, что неприменимо для нахлесточных и телескопических соединений, имеющих паяный шов по радиусу соединения.

Воздействие энергии высокочастотных (ВЧ) электромагнитных колебаний позволяет осуществить не только высокопроизводительный бесконтактный нагрев проводящих материалов с помощью наведенных в них вихревых токов, но и активировать расплавленный припой и улучшить его растекание по паяемым поверхностям. Качество паяных соединений зависит от таких факторов, как: частоты колебаний, скорости нагрева и избирательности, регулируемости нагрева во времени и по сечению паяемых деталей [3]. Моделирование воздействия ВЧ электромагнитной энергии позволяет оптимизировать скорость нагрева в локальных зонах формирования соединений и улучшить качество соединений за счет совместного действия поверхностного эффекта и пондеромоторных сил. Предпочтительным является применение индуктора на магнитопроводе, так как у него рабочая частота на порядок ниже, что увеличивает его КПД за счет снижения излучения тепла в окружающую среду [4]. Снижение частоты электромагнитных колебаний увеличивает электродинамический эффект перемешивания расплавленного припоя [5].

Методика эксперимента

Для определения коэффициента растекания расплава и угла смачивания θ использовано соотношение работ сил адгезии и когезии. Работа сил адгезии $W_а$ связана с образованием межфазной границы расплав–твердое тело с энергией $\sigma_{2,3}$ вместо поверхностей расплав–газовая среда с энергией $\sigma_{1,2}$ и твердое тело–газовая среда $\sigma_{1,3}$:

$$W_а = \sigma_{1,2} + \sigma_{1,3} + \sigma_{2,3}\,. \qquad (1)$$

Для преодоления сил сцепления частиц внутри расплава необходимо затратить работу сил когезии по образованию двух единичных поверхностей расплава с энергиями $\sigma_{1,2}$, т. е.

$$W_к = 2\sigma_{1,2}\,. \qquad (2)$$

Коэффициент растекания определяем из условия отношения работ сил адгезии и когезии [6]:

$$\text{Кр} = \text{W}_a / \text{W}_к = \sigma_{1,2}(\cos\theta + 1)/2\sigma_{1,2} = (1+\cos\theta)/2\,. \qquad (3)$$

Тогда при полном смачивании $\theta = 0$, $\cos\theta = 1$, $K_p=1$; ограниченном $0 \le \theta \le 90^o$, $0 < \cos\theta \le 1$, $K_p=0{,}5$; несмачивании $90^o \le \theta < 180^o$, $-1 \le \cos\theta < 0$, $Kp=0$.

Для увеличения площади растекания воздействуют на расплав пондеромоторными силами, возникающими при взаимодействии электрических и магнитных полей с расплавом на поверхности проводящего твердого тела в рабочей зоне индуктора на магнитопроводе. Для этого в зоне нагрева размещают проводящее тело, в котором наводятся вихревые токи той же частоты что и в индукторе (рис. 2). Сила, возникающая при взаимодействии индукции магнитного поля B и амплитуды вихревого тока I в проводнике длиной l, имеет направленное действие и определяется по формуле:

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

где

$$B = \frac{U_m}{4{,}44 Sfw}\,, \qquad (5)$$

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

Появление пондеромоторной силы F вносит изменение в равновесие сил поверхностного натяжения на границе расплав–твердое тело:

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{1,3} + \sigma_F - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}, \qquad (6)$$

где σ_F–поверхностное натяжение, обусловленное действием силы F:

$$\sigma_F = \frac{F}{2l} = \frac{BI}{2}. \qquad (7)$$

Тогда соотношение коэффициентов растекания в электромагнитных полях и в обычном состоянии выразится как:

$$\frac{K_p}{K_{po}} = 1 + \frac{\sigma_F}{(1+\cos\theta)\sigma_{1,2}}. \qquad (9)$$

При смачиваемости поверхности, близкой к полной, $\cos\theta \to 1$, $\sigma_{1,2}$= 0,5 Н/м, индукции магнитного поля B= 0,4–1,2 Тл и величине электрического тока через расплав I=1–10А коэффициент растекания припоя за счет пондеромоторных сил теоретически может возрасти в 2 – 4 раза (рис. 3).

Для экспериментальной проверки результатов моделирования пондеромоторная сила в расплаве припоя возбуждалась в рабочей зоне магнитопровода индуктора таким образом, что исходная доза расплава припоя располагалась в центре проводящей площадки на изоляционной плате и в зоне действия магнитного поля, а замыкающий участок проводящего контура – за пределами зоны нагрева (рис. 4). Таким образом, в проводящем контуре и в расплаве припоя наводились вихревые токи, которые взаимодействуя с магнитным полем в рабочей зоне магнитопровода, вызывали появление пондеромоторных сил.

Для усиления воздействия пондеромоторных сил на расплав припоя их возбуждали с помощью устройства (рис. 5,а), состоящего из генератора G и

источника импульсов тока ИП. Проводящее тело 1 и припой 2 в виде дозированной заготовки нагревали энергией ЭМ поля в зазоре магнитопровода 3 и пропускали импульсы электрического тока плотностью 1–5 А/мм^2 через расплав припоя с помощью токовводов 4 в направлении, перпендикулярном вектору индукции магнитного поля, с одновременным вращением тела вокруг собственной оси с частотой w [7]. Возникающие пондеромоторные силы действовали в расплаве припоя в направлении, перпендикулярном вектору электрического тока, а вращение изделия обеспечивало равномерное растекание припоя.

Для телескопических соединений схема устройства (рис. 5,б) отличалась лишь конструкцией токовводов. Соединяемые детали 1 и припой 2 в виде кольца располагали в зазоре магнитопровода 3 индуктора. 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 деталей 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.

Результаты эксперимента и их обсуждение

При экспериментальной проверке результатов моделирования пондеромоторная сила в расплаве припоя возбуждалась при взаимодействии вихревого тока в проводящем теле с переменным магнитным полем в рабочей зоне магнитопровода индуктора. Под действием вихревого тока величиной 10–15 А и индукции магнитного поля до 0,5 Тл скорость нагрева с замкнутым контуром увеличилась на 15– 20 %, а коэффициент растекания припоя в 1,5–1,7 раза (рис. 6). При большой силе электрического тока, пропускаемого через

расплав, увеличивается его температура, ускоряется рост оксидной пленки, что ограничивает увеличения коэффициента растекания.

Пайку деталей из меди шириной 5 мм внахлестку дозированной заготовкой припоя массой 200 мг осуществляли в зазоре магнитопровода индуктора сечением 300 мм на частоте 66 кГц с использованием спирто-канифольного флюса. Возникающие пондеромоторные силы в Е+Н полях вызывали значительные по амплитуде вибрации расплава припоя, большие, чем ультразвуковые колебания. Это позволяло активно перемешивать припой, увеличивать его растекание. Коэффициент растекания припоя в обычных условиях составлял 1,1–1,2, при пропускании электрического тока плотностью до 5 А/мм^2 – 1,4– 1,5.

Пайку телескопического соединения трубок из латуни ЛС59–1 диаметром 6,0 и 6,5 мм вели с использованием кольца припоя ПОС61 диаметром 1,0 мм в течение 5–7 с. Пропускание электрического тока плотностью до 10 А/мм^2 и вращение деталей со скоростью 60 об/мин обеспечило 100% заполнение глубиной 10 мм. Прочность паяного соединения в этом случае возросла на 20–25%.

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 0,05 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 массу расплава припоя равномерно по поверхности изделия. Скорость вращения изделия зависела от времени пайки и выбиралась таким, чтобы изделие совершало 2 - 3 оборота за время пайки.

Выводы

Взаимодействие электрических и магнитных полей с расплавами металлов создает возможность управления процессом растекания расплава по поверхности твердого тела за счет действия пондеромоторных сил. Это увеличивает площадь растекания расплава, его проникновение в капиллярные зазоры в соединениях, что в конечном итоге способствует увеличению механической прочности паяных соединений и снижению их переходного электрического сопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Abramov O.V.* High-intensity Ultrasonics: Theory and Industrial. Amsterdam: OPA. 1998. 692 p.
2. *Хатажуков А.С., Хоконов Х.Б.* Авт. свид. (СССР) № 942917. Способ управления площадью растекания припоя по поверхности твердого тела / B23K 1/00, 1982.
3. Induction Heating. Industrial Applications / Ed. by S. Lupi, Paris, U.I.E. 1992. 142 p.
4. *Румак Н.В., Ланин В.Л., Чернышевич И.Н.* Экономичный бесконтактный нагрев энергией переменного магнитного поля // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1994. №2. С. 94–96.
5. *Ланин В. Л.* Бесконтактные вибрации в процессах высокочастотного электромагнитного нагрева // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 3. С. 43–45.
6. *Ланин В.Л., Достанко А.П., Телеш Е.В.* Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники. Минск: Издат. Центр БГУ, 2007. 574 с.
7. *Ланин В.Л., Чернышевич И.Н., Бондарик В.М.* Способ пайки изделий: пат. 2686 Беларусь, МКИ^6 B23K 1/06, H05B 6/02 // Афіцыйны бюл. Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. 1998. № 1. С. 101.

Поступила 2010

УДК 534.8: 539.3

Растекание расплавов по поверхности твердых тел при взаимодействии с электрическими и магнитными полями. Ланин В. Л. // Электронная обработка материалов. 2010. № ( ). С.

Взаимодействие электрических и магнитных полей с расплавами металлов увеличивает площадь растекания расплава по поверхности проводящих тел и проникновение в капиллярные зазоры в соединениях за счет действия пондеромоторных сил, что способствует повышению механической прочности паяных соединений.

Библиогр. 7. Ил. 6.

Summary

Co-operation electric and magnetic fields with melts of metals increases the area of spread melts on surfaces of conducting bodies and penetration into capillary backlashes in connections due to action electrodynamic forces that promotes increase of mechanical durability of soldering connections.

Рисунки

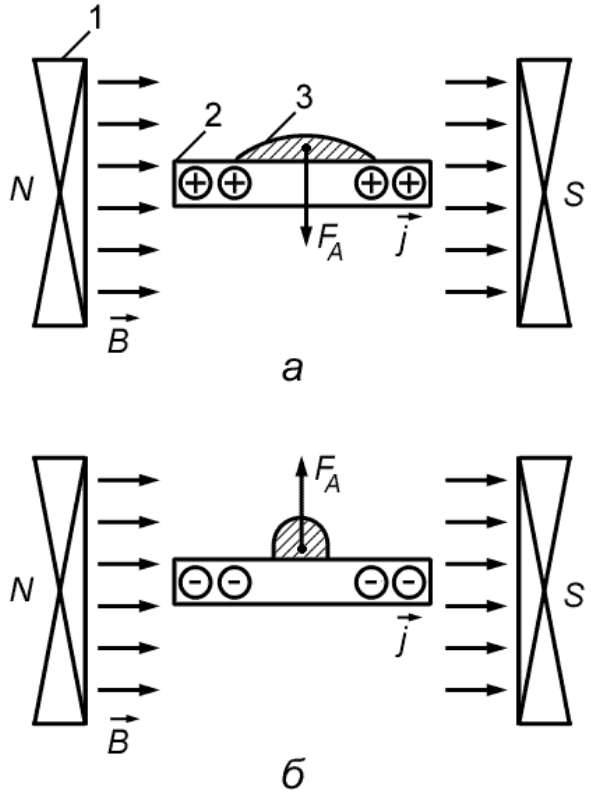


Рис. 1. Схема увеличения (а) и ограничения (б) растекания припоя в Е+Н полях: 1–постоянный магнит, 2–твердое тело, 3–расплав

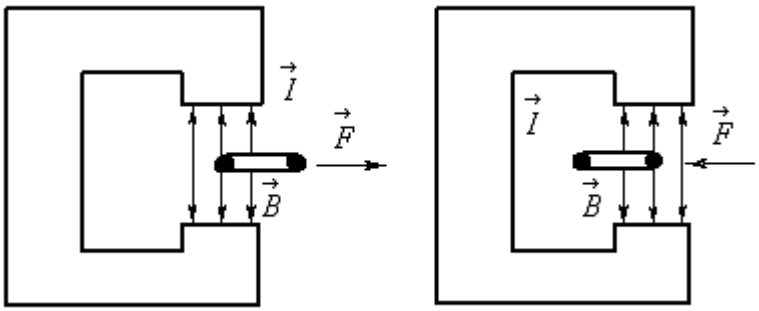


Рис. 2. Схема взаимодействия проводника с током с магнитным полем

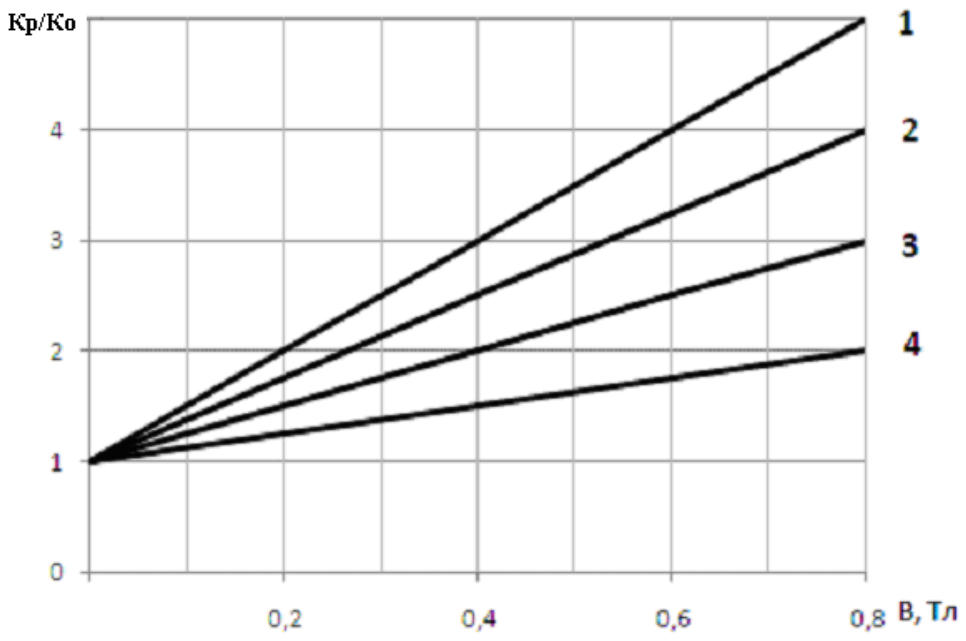


Рис. 3. Зависимости отношения коэффициентов растекания припоя от напряженности магнитного поля и величины тока: 1–10А, 2–7,5 А, 3–5 А, 4–2,5 А

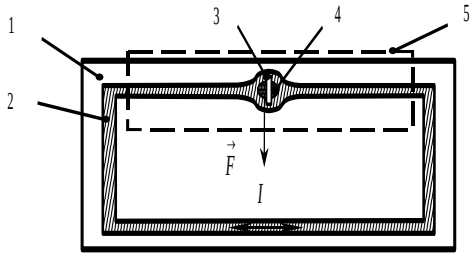
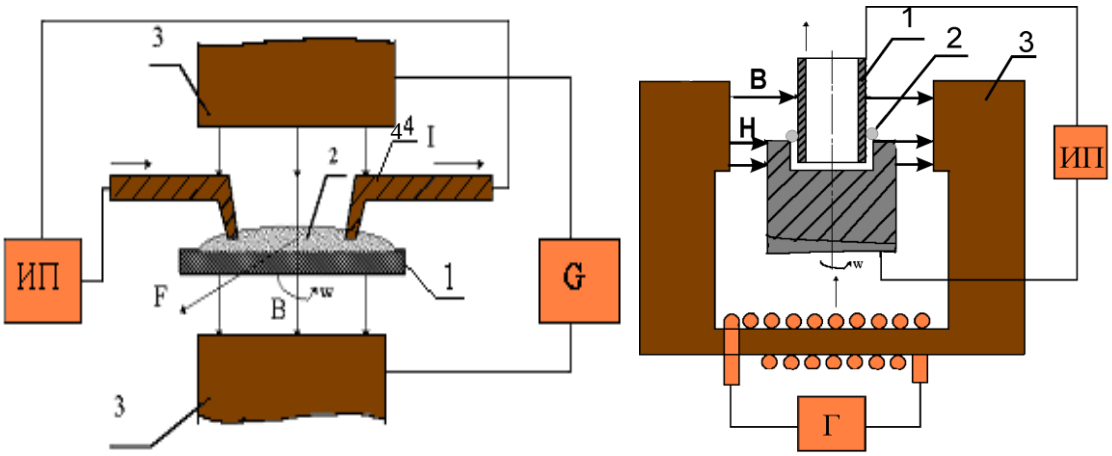


Рис. 4. Схема действия пондеромоторной силы на припой:

1 – изоляционная плата, 2 – проводник, 3 – прорезь, 4 - контактная площадка с припоем, 5 – проекция индуктора



а б

Рис. 5. Схемы исследования растекания расплавов при воздействии энергии магнитного и электрического полей

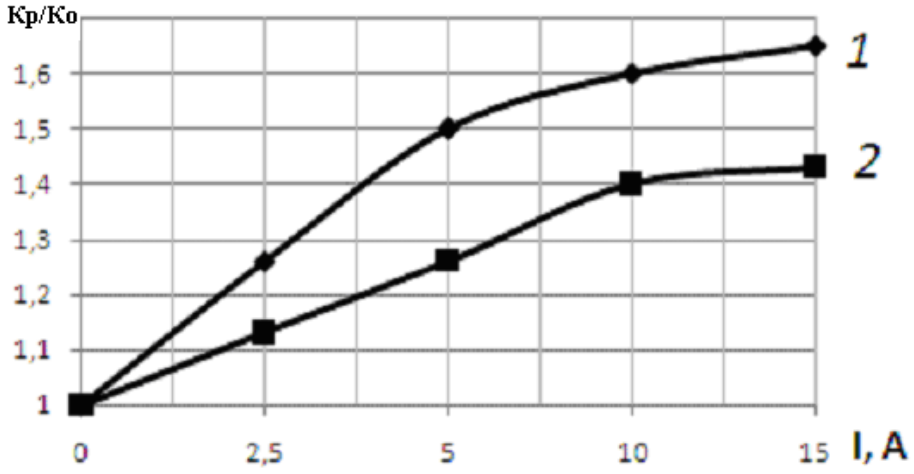


Рис. 6. Экспериментальные зависимости отношения коэффициентов растекания припоя от величины тока и напряженности магнитного поля: 0,5 Тл (1) и 0,35 Тл (2)