

Сравнительная эффективность инфракрасных источников нагрева для монтажа и демонтажа электронных модулей

*В. Л. Ланин, А. И. Лаппо

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

Оценена эффективность коротко- и средневолновых инфракрасных (ИК) источников нагрева, применяемых для монтажа и демонтажа электронных модулей. Анализ моделей тепловых полей показал, что для галогенной ИК лампы накаливания КГМ 30/300 неравномерность нагрева печатной платы составила 45–55°C, а неравномерность температуры корпусов электронных компонентов – 90–100°C. Для керамического ИК нагревателя Elstein SHTS/4 неравномерность нагрева печатной платы составила 8–13°C, температура корпусов SMD компонентов отличается от температуры платы: BGA на 28–32, QFP – 24–26 и SMD – 5–20°C. Применение средневолновых керамических инфракрасных источников позволяет достичь более высокой равномерности нагрева в рабочей зоне и обеспечить оптимальный температурный профиль при монтаже и демонтаже поверхностно монтируемых электронных компонентов.

Ключевые слова: инфракрасное излучение, источники нагрева, монтаж, демонтаж, электронные модули.

УДК 621.365 (075.6)

ВВЕДЕНИЕ

Применение инфракрасных (ИК) источников позволяет осуществить локальный нагрев при монтаже электронных модулей, уменьшить время нагрева изделия и снизить риск повреждения электронных компонентов. Нагрев ИК излучением имеет ряд технологических преимуществ, однако их реализация зависит от правильного выбора источника нагрева и конструкции установки ИК нагрева. В настоящее время широкое применение в технологических процессах получили два вида ИК нагрева: локальный сфокусированный и прецизионный рассеянный. В зависимости от конкретных условий используют различные по геометрии рефлекторы, формирующие тепловое поле в зоне нагрева [1].

Технология ИК пайки, зарекомендовавшая себя рядом достоинств, таких как [2] высокая скорость и избирательность нагрева, возможность управления термопрофилем, требует дальнейшего развития для повышения качества монтажа и демонтажа поверхностных компонентов в электронных модулях с плотной компоновкой. Для обоснованного выбора источников ИК нагрева необходимы анализ тепловых полей нагреваемых объектов, оценка влияния расстояния от нагревателя до печатной платы на равномерность и скорость нагрева [3].

На сегодняшний день наиболее совершенным является метод локального ИК нагрева [4], который производится сфокусированным пучком инфракрасного излучения только в местах пайки.

Обязательная процедура при этом – подогрев платы снизу для предотвращения ее деформации. ИК керамические нагреватели за счет большой температуры нагрева и высокой инерционности поддерживают стабильную температуру, что очень важно для бессвинцовой пайки. В ИК паяльных станциях применяют излучатели, с помощью которых возможно достижение высокой температуры за минимальное время.

Основным фактором, обеспечивающим качество паяных соединений поверхностно монтируемых компонентов в процессе монтажа и сохранности ремонтируемого изделия во время демонтажа неисправного компонента, является правильный выбор источника нагрева. Применение ИК источников позволяет осуществить локальный нагрев, уменьшить время нагрева ремонтируемого изделия и снизить риск повреждения электронного компонента.

Цель работы – оценка эффективности коротко- и средневолновых инфракрасных источников нагрева, применяемых для монтажа и демонтажа электронных модулей, а также оптимизация температурных профилей нагрева поверхностно монтируемых электронных компонентов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ИНФРАКРАСНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Интенсивность спектрального излучения I источника зависит от температуры T , длины волны λ и спектральной степени черноты излучателя [5]:

$$I_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1}, \quad (1)$$

где C_1 , C_2 – постоянные Планка, соответственно равные 3,74 мВт/кв·м и 0,1439 м·К; ε_{λ} – отражающая способность излучателя.

Длину волны, при которой плотность потока излучения черного тела достигает максимального значения для данной температуры, определяют из закона Планка посредством выполнения условий максимума [6]:

$$\frac{dE_{\lambda}}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \right]_{T=\text{const}} = 0, \quad (2)$$

где E_{λ} – плотность потока спектрального излучения черного тела при температуре T .

Решение уравнения (2) дает формулу закона смещения Вина:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}, \quad (3)$$

где λ_{max} – длина волны, при которой достигается максимум монохроматической плотности потока излучения черного тела с температурой T .

Таким образом, более высокая температура излучателя приводит к более короткой длине волны и, как результат, – к увеличению тепловой эмиссии. В соответствии с законом Стефана-Больцмана излучаемое с единицы поверхности тепло определяется, как в [5]:

$$Q = F_s \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot S_n \cdot (T_n^4 - T_s^4), \quad (4)$$

где F_s – угловой коэффициент (выбирается из рис. 1 в зависимости от соотношения размеров нагревателей и области пайки (рис. 2)); ε – излучательная способность тела; σ – постоянная Стефана-Больцмана; S_n – площадь нагрева; T_n – температура нагревателя; T_s – температура нагреваемой поверхности.

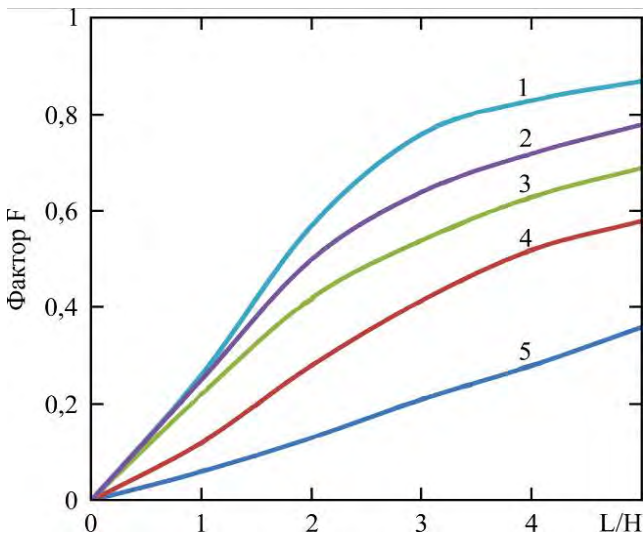


Рис. 1. Зависимости фактора F_s от расстояний от источника до поверхности и размеров областей нагрева: 1 – между небольшим источником и квадратной областью (рис. 2а); 2 – между линейным источником и прямоугольной областью (рис. 2б); 3–5 – между прямоугольным источником с размерами $L \times L$, $L \times 2L$, и $L \times 5L$ соответственно (рис. 2в–д).

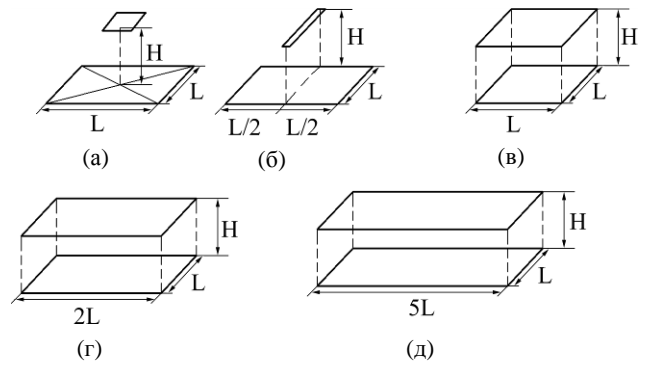


Рис. 2. Расположение нагревателей относительно областей нагрева.

Для моделирования процессов ИК нагрева применен метод конечных элементов, позволяющий построить модели систем, имеющих сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную физическую структуру. Для ИК нагрева рассматривается только интегральное, то есть суммарное, по всем длинам волн излучение. Излучающие тепло поверхности задаются абсолютно черными, абсолютно белыми или идеально серыми, так что в соответствии с законом Ламберта их излучение предполагается диффузным, то есть с независимой от направления излучения яркостью. Начальные условия задаются с помощью Wizard модуля Flow Simulation программного комплекса SolidWorks 2012. К ним относятся: система единиц измерения, тип анализа, тип окружающей среды, материал по умолчанию, параметры теплообмена, значения начальных и окружающих условий, точность моделирования.

Параметры радиационных поверхностей (Radiative surfaces), источников излучения (Radiative sources) и источников тепла (Surface source), такие как излучающие поверхности, температура излучающей поверхности, а также материалы для каждого компонента в модуле, задаются дополнительными настройками.

В качестве модели использовалась 4-слойная печатная плата с габаритными размерами 40x40 мм и установленными на ней компонентами в корпусах BGA, QFP и SMD – 0805, 1206, 1210. Расстояние от нагревательных элементов до платы составляло 20 мм. Результатом моделирования являются тепловые поля на поверхности модуля с установленными на нем поверхностно монтируемыми компонентами [7].

Анализ тепловых полей показывает, что для галогенной ИК лампы накаливания КГМ 30/300 (рис. 3а) неравномерность нагрева печатной платы составила 45–55°C, основной нагрев сосредоточен в центре, где достигает пика температуры в 200–205°C, тогда как к краям не превышает 140°C. На корпусах электронных компонентов неравномерность температуры составляет 90–100°C. Для керамического ИК нагревателя

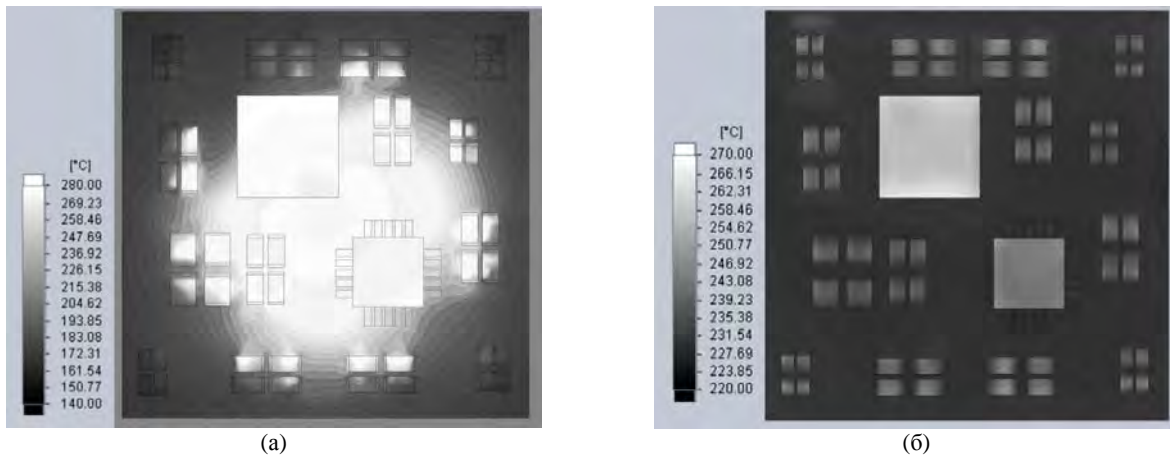


Рис. 3. Тепловые поля на поверхности электронного модуля: (а) – галогенная ИК лампа КГМ 30/300; (б) – керамический ИК нагреватель Elstein SHTS/4 (моделирование).

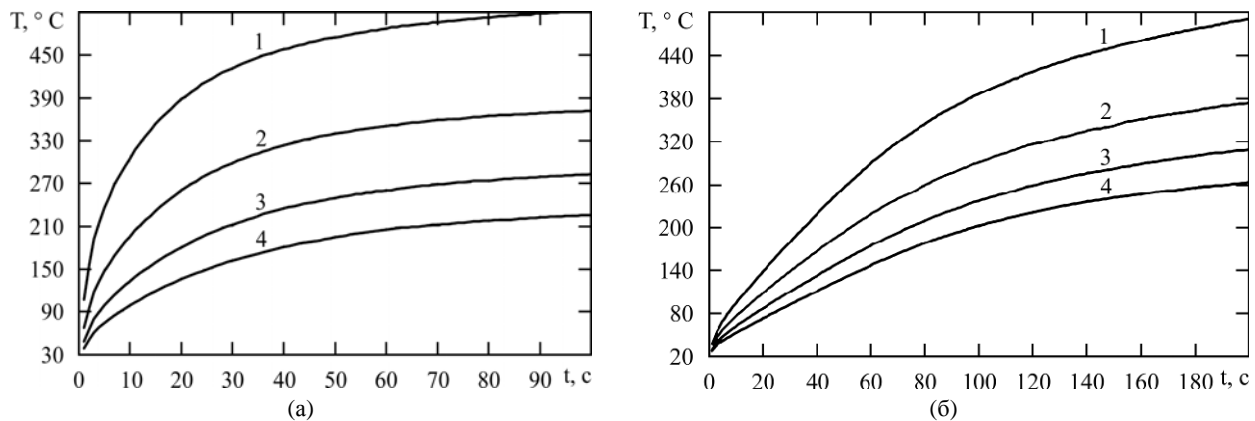


Рис. 4. Температурно-временные зависимости: (а) – галогенная ИК лампа КГМ 30/300; (б) – керамический ИК нагреватель Elstein SHTS/4 при расстояниях до платы, мм: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40.

Elstein SHTS/4 (рис. 3б) неравномерность нагрева печатной платы составляет 8–13°C, температура корпусов поверхностно монтируемых компонентов отличается от температуры печатной платы: BGA на 28–32°C, QFP – 24–26°C и SMD – 5–20°C.

Для оптимизации параметров ИК нагрева проведено моделирование скорости нагрева и распределения тепловых полей в зависимости от расстояния между нагревательным элементом и электронным модулем. На температурно-временных зависимостях (рис. 4) видно, что с увеличением расстояния до электронного модуля скорость нагрева снижается в 2 раза на каждые 10 мм для коротковолновых нагревателей (галогенная ИК лампа) и в 1,5 раза для средневолновых (керамический нагревательный элемент). При расстоянии более 20 мм ИК нагрев становится равномерным, разброс температуры не превышает 3–5% для компонентов и 5–7% – для печатной платы.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследованные ИК нагреватели встроены в паяльную станцию для проведения монтажа и демонтажа поверхностно монтируемых компо-

нентов в различных корпусах на печатную плату. ИК станция состоит из систем верхнего и нижнего нагрева, охлаждения, блока управления и устройства индикации. В конструкции предусмотрено переменное использование двух типов верхних нагревательных блоков с возможностью их быстрой замены. Установка нагревателей производится так, чтобы их нагревающая поверхность располагалась над зоной пайки. Нижний нагреватель, предназначенный для предварительного нагрева печатной платы до температуры 130–170°C с целью защиты монтируемых компонентов и платы от термоудара, включает в себя две галогенные лампы КИ 220–1000, отражатель и теплорассеивающую пластину. Система охлаждения состоит из трех вентиляторов, два из которых размещены на поверхности корпуса для охлаждения паемого модуля и верхнего нагревателя и один установлен внутри корпуса для охлаждения нижнего нагревательного блока. Микроконтроллерный блок управления обеспечивает автоматизированный контроль процесса нагрева и поддержание заданного температурного профиля, что в свою очередь значительно повышает качество пайки. Информация о режиме работы нагревателей и текущей температуре выводится на ЖК экран (рис. 5).



Рис. 5. Установка ИК пайки с верхним средневолновым керамическим излучателем.

Контроль температуры обеспечивается с помощью термоэлектрического преобразователя (термопара типа ХК, ТХК), сигнал с которого через усилитель постоянного тока на основе операционного усилителя поступает на микроконтроллер. С помощью встроенного 10-битного аналого-цифрового преобразователя измеренный аналоговый сигнал преобразовывается в двоичную форму. Для минимизации ошибки измерения усиленный сигнал термопары измеряется 20 раз в секунду с последующим вычислением среднего значения. Алгоритм вычислений оптимизирован для выполнения на микроконтроллерах семейства MSP430. С учетом рассчитанной температуры производится управление электромагнитными реле, управляющими верхним и нижним нагревателями. Измеренная температура, а также текущие состояния реле отображаются на жидкокристаллическом дисплее.

Исследованы термопрофили ИК пайки SMD компонентов при мощности нижнего нагрева 1000 Вт с применением ИК нагревателей в ближней ИК области (0,7–1,5 мкм) – галогенная ИК лампа накаливания КГМ 30/300 и в средней области (2–10 мкм) – керамический ИК нагреватель Elstein SHTS/4. Для автоматизации обработки данных применены измеритель-регулятор ОВЕН ТРМ210 и персональный компьютер.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Термопрофили пайки галогенной ИК лампой накаливания КГМ 30/300 и керамическим ИК нагревателем Elstein SHTS/4 показаны на рис. 6. На этапе предварительного нагрева формы термопрофилей близки друг другу. Это объясняется тем, что на данном этапе нагрев осуществляется только нижним нагревателем, который в ходе эксперимента не менялся. Для галогенной ИК лампы характерна большая – на 71–74% – скорость нагрева по сравнению с керамическими нагревателями, что дает основание для выбора данного источника как основного нагревательного элемента в автоматизированных производ-

ственных линиях с высокой производительностью.

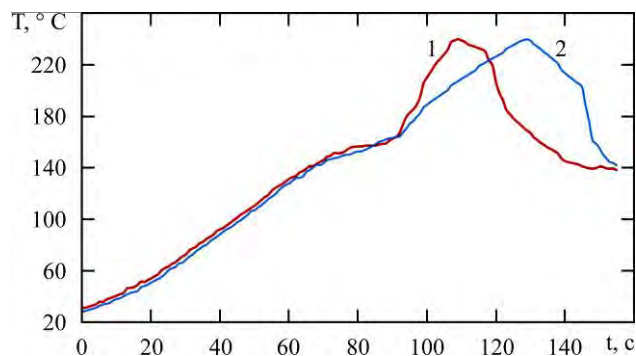


Рис. 6. Термопрофили пайки припоем ПОС61: 1 – галогенная ИК лампа КГМ 30/300; 2 – керамический ИК нагреватель Elstein SHTS/4.

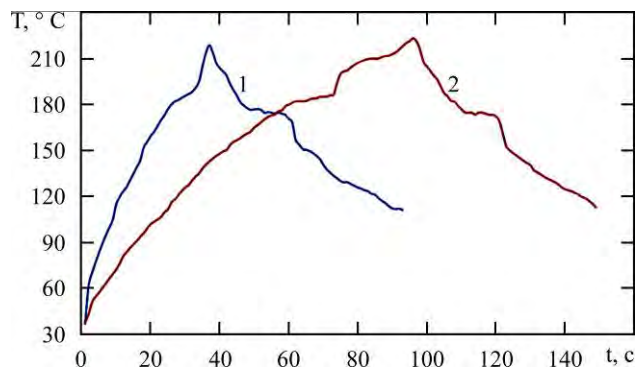


Рис. 7. Термопрофили пайки керамическим ИК нагревателем Elstein SHTS/4, мм: 1 – 10; 2 – 30.

Анализ термопрофилей пайки корпусов BGA ИК нагревателем Elstein SHTS/4 (рис. 7) на расстоянии 10 и 30 мм показал, что при увеличении расстояния в три раза скорость нагрева до температуры пайки увеличилась в 2–3 раза. Форма изотерм полей нагрева галогенной лампы накаливания (рис. 8а) свидетельствует о высокой неравномерности процесса пайки, где максимальная скорость нагрева, равная 20–22°C/c, зафиксирована на площади до 6–7 мм по оси X и 4–5 мм – по оси Y, далее через 3–4 мм по направлению к осям скорость нагрева снижается до 13–15°C/c, а затем – до 8–10°C/c через 4–5 мм.

Керамический ИК нагреватель (рис. 8б) имеет сравнительно высокую равномерность нагрева, формы тепловых полей симметричны и не зависят от направления. Скорость составила 3–4°C/c на расстоянии 25 мм от центра, при 30 мм снижается до 2–3°C/c и при 35 мм – до 0,5–1°C/c.

По результатам моделирования в программном комплексе SolidWorks 2012 тепловых полей для нагревателей в ближней и средней ИК области были получены распределения неравномерности прогрева печатной платы и корпусов установленных компонентов, которые составили: 34–36% и 26–44% для ближней ИК области, 3–4% и 8–12% – для средней соответственно.

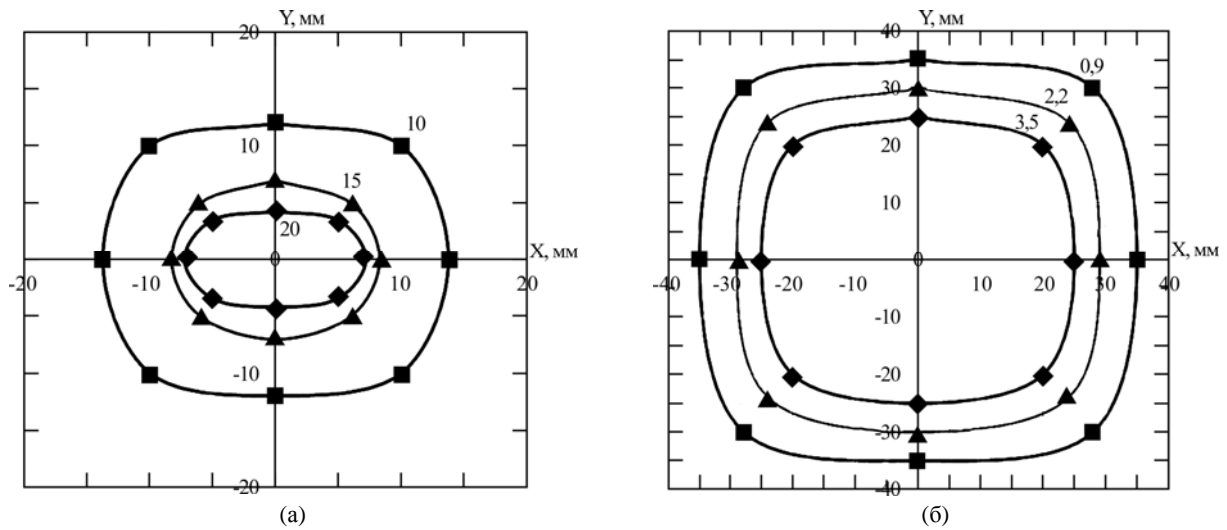


Рис. 8. Тепловые поля скорости ИК нагрева, °C/c: (а) – КГМ 30/300; (б) – Elstein SHTS/4.

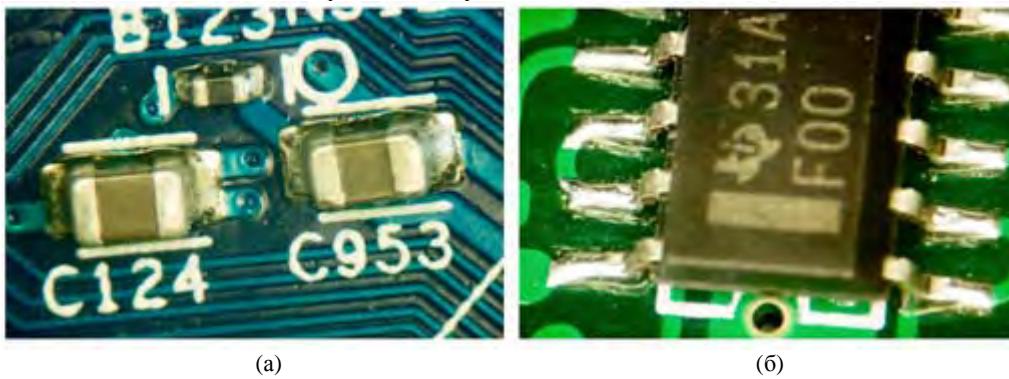


Рис. 9. Качественные паяные соединения: (а) – SMD конденсаторы; (б) – микросхема с плоскими выводами.

Лучшие характеристики нагрева по результатам моделирования были получены в средней ИК области, ближняя ИК область имеет преимущество только по скорости нагрева, так, до температуры пайки на расстоянии в 30 мм до поверхности платы время составило 30 с против 60 с средневолнового излучателя. Оптимальное расстояние от поверхности модуля до нагревательного элемента должно быть в пределах 20–25 мм, при котором неравномерность нагрева составляет 3–5% для компонентов и 5–7% – для печатной платы.

Исследование температурных полей галогенной лампы накаливания свидетельствует о высокой неравномерности процесса, когда максимальная скорость нагрева 20–22°C/c достигается на расстоянии 4–7 мм от центра исследуемого печатного модуля. Керамический ИК нагреватель показал в среднем одинаковую скорость нагрева на уровне 3–4°C/c на расстоянии 25 мм от центра, но при этом скорость нагрева снизилась в 5–7 раз в сравнении с галогенной ИК лампой.

В процессе монтажа поверхностно монтируемых компонентов были получены контактные соединения, ряд которых имел дефекты. Шарики припоя, представляющие собой сферические образования, выявлены возле контактов транзисто-

ров и конденсаторов. Причиной образования дефекта могли быть неправильный выбор режимов пайки и интенсивное испарение растворителя на стадии предварительного нагрева. После проведения дополнительной настройки ИК станции произведен повторный монтаж поверхностно монтируемых компонентов в различных корпусах. Изучив паяные соединения установленных компонентов (рис. 9) под микроскопом Cartop NSWT-620.PFM-X, можно сделать заключение, что они соответствуют стандарту IPC-A-610D.

ВЫВОДЫ

Анализ моделей тепловых полей показывает, что для галогенной ИК лампы накаливания КГМ 30/300 неравномерность нагрева печатной платы составила 45–55°C, а на корпусах электронных компонентов неравномерность температуры – 90–100°C. Для керамического ИК нагревателя Elstein SHTS/4 неравномерность нагрева печатной платы составляет 8–13°C, температура корпусов SMD компонентов отличается от температуры платы: BGA на 28–32, QFP – 24–26 и SMD – 5–20°C.

Форма экспериментальных изотерм нагрева галогенной лампы накаливания свидетельствует о неравномерности тепловых полей, где максимальная скорость нагрева 20°C/c сосредоточена

на площади, равной 120 мм². Керамический ИК нагреватель имеет более высокую равномерность нагрева, но его применение снижает в 5–7 раз скорость нагрева в сравнении с ИК лампой, которая составила 3–4°C/с. Поэтому галогенные ИК лампы с большей скоростью нагрева являются основным нагревательным элементом в автоматизированных линиях монтажа с высокой производительностью.

Применение керамических ИК источников среднего диапазона оптимально в ИК станциях, предназначенных для ремонта изделий с SMD компонентами, поскольку для них требуется высокая равномерность нагрева поверхности изделия во время проведения монтажных работ, а за счет увеличения времени нагрева снижаются термические напряжения в объеме компонентов изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зворыкин Д.Б. *Отражательные печи инфракрасного нагрева*. М.: Машиностроение, 1985. 176 с.
2. Lee N.-C. *Reflow soldering processes and troubleshooting: SMT, BGA, CSP and flip chip technologies*. Boston: Newnes, 2002. 270 p.
3. Anguiano C., Felix V., Salazar D., Marquez H. *Optics Express*. 2013, **21**(20), 23851–23855.
4. Lanin V.L. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2007, **43**(5), 381–386.
5. Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Сарапулов Ф.Н. *Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в электротехнических установках*. М.: ФОРУМ ИНФРА-М, 2005. 560 с.
6. Norman R.C. *SMT*. 1986, (10), 27–30.
7. Ланин В.Л., Лаппо А.И., Лавор Т.Э. *Технологии в электронной промышленности*. 2015, (3), 60–62.

Поступила 09.07.15

После доработки 18.09.15

Summary

The efficiency of short – and mean-wave IR sources of heat applied to mounting and demounting of electronic modules is sized up. The analysis of the models of thermal fields shows that for IR lamps, the irregularity of heating of the printed-circuit board is of 45–55°C, while for electronic components, the irregularity of temperature is 90–100°C. For ceramic IR radiator Elstein SHTS/4, the irregularity of heating of the printed-circuit board makes up 8–13°C, the temperature of the SMD components packages differs from the plate temperature: in BGA by 28–32°C, in QFP – 24–26°C, and in SMD – 5–20°C. Application of mean-wave ceramic IR sources allows attaining higher uniformity of heat in a working area and ensuring an optimal temperature profile at mounting and demounting of the surface-mounted electronic components.

Keywords: infrared radiation, heat sources, mounting, demounting, electronic modules.