

Оптимизация инфракрасного нагрева при монтаже многовыводных μ BGA микросхем на многослойные печатные платы

С увеличением функциональной сложности электронных компонентов растут проблемы их монтажа в электронных модулях на многослойных печатных платах. Инфракрасные источники обеспечивают высокую регулируемость температуры в зоне нагрева и заданный температурный профиль монтажа при условии оптимизации процесса теплообмена.

Владимир Ланин,
профессор

vlanin@bsuir.by

Валерий Парковский

Rocker-87@yandex.ru

Введение

Увеличение производительности компьютерной техники и средств цифровой связи наряду с повышением быстродействия элементной базы находится в непосредственной зависимости от сокращения длины связей между логическими элементами, так называемой конструктивной задержки передаваемого сигнала. Высокую функциональную сложность электронных модулей и высокую степень интеграции электронных компонентов невозможно реализовать без принципиального совершенствования системы контактных соединений, так как согласно правилу Рента число сигнальных выводов изделия определяется как $n = 4,5m^{0,4}$, где m — число вентилях в кристалле. Разработка микропроцессоров с рабочей частотой сигнала до 5 ГГц увеличивает размер корпуса до 50×50 мм и число выводов до 2401.

Особенности процессов формирования контактных соединений в современных электронных модулях:

- широкая номенклатура используемых электронных компонентов, интегральных микросхем, микросборок;
- различные виды соединений электронных компонентов на печатных, двусторонних и многослойных платах;
- микросоединения на подложках, микроплатах, в многокристальных модулях;
- разнообразные по физической природе источники теплового излучения: потоки расплавленного припоя, нагретый инструмент, концентрированные потоки энергии электромагнитных полей в широком частотном диапазоне [1].

Переход на бессвинцовые припои при монтаже электронных модулей ставит ряд задач по обеспечению хорошей смачиваемости поверхностей и оптимизации температурных профилей нагрева, а также по контролю качества соединений.

Помимо монтажа, высока трудоемкость и демонтажа интегральных и дискретных компонентов, при этом важно учитывать температурный режим, так

как длительное воздействие температуры может привести к выводу компонентов и платы модуля из строя. Одна из основных проблем при демонтаже — большая номенклатура выводных и безвыводных электронных компонентов и многовыводных интегральных микросхем, применяемых как в керамических, так и пластиковых корпусах типа BGA, μ BGA, QFP, а также Flip-Chip и Chip on Board (COB) [2]. Для каждого типа корпуса соответственно необходима индивидуальная оснастка для демонтажа.

Процессы конвективного и инфракрасного нагрева широко применяются для монтажа и демонтажа электронных и интегральных компонентов с печатных плат. Эти процессы требуют максимально точного контроля температуры в зоне нагрева, поскольку стоимость электронных модулей достигает нескольких тысяч долларов, а зачастую стоимость многослойной платы может в несколько раз превышать стоимость демонтируемого электронного компонента. При длительном воздействии высокой температуры на печатную плату может возникнуть ее коробление, что приведет к ухудшению ее механических и прочностных характеристик и как следствие — ухудшению электрических параметров (волнового сопротивления), так как появление микротрещин в медных проводниках приводит к изменению их сопротивления.

При монтаже/демонтаже небольших по размерам электронных компонентов с широким шагом выводов и их количеством до 100 в мелкосерийном и единичном производстве или в процессе ремонта распространен процесс конвективного нагрева. Однако при монтаже/демонтаже многовыводных компонентов (100 выводов и более), особенно для таких корпусов, как BGA, μ BGA, QFP и PLCC, в основном используется инфракрасный нагрев [3].

Инфракрасные источники нагрева широко применяются при ремонте электронных модулей как в единичном, так и в серийном производстве. Их использование для монтажа и демонтажа многовыводных поверхностно монтируемых компонентов обусловлено возможностью высокой точности контроля

температуры, в то время как для конвективных источников это проблематично.

Моделирование инфракрасного нагрева

Для моделирования процесса нагрева инфракрасным излучением применен программный комплекс CosmosWorks (приложение программы SolidWorks), основанный на методе конечных элементов [4]. Наряду с моделированием диффузии тепла в текучей среде в этом комплексе моделируется также теплопередача в твердых телах с помощью уравнения:

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H, \quad (1)$$

где ρ — плотность; $e = cT$; c — удельная теплоемкость; T — температура; λ — теплопроводность; Q_H — удельное (в единице объема) тепловыделение источника тепла.

При моделировании теплопередачи в твердом теле следует учитывать, что тело состоит из нескольких слоев с контактными тепловыми сопротивлениями между ними, которые задаются пользователем.

Для инфракрасного 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 не зависящей от направления излучения яркостью. В соответствии с законом Стефана-Больцмана, излучаемое с единицы поверхности тепло определяется как [3]:

$$Q = F_S \times \varepsilon \times \sigma \times S_H (T_H^4 - T_S^4), \quad (2)$$

где F_S — угловой коэффициент; ε — излучательная способность тела; σ — постоянная Стефана-Больцмана; S_H — площадь нагрева; T_H — температура нагревателя; T_S — температура нагреваемой поверхности.

Длина волны, при которой плотность потока излучения черного тела достигает максимального значения для данной температуры, может быть определена из закона Планка посредством выполнения условий максимума [5]:

$$\frac{dE_\lambda}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \right]_{T=\text{const}} = 0, \quad (3)$$

где E_λ — плотность потока монохроматического или спектрального излучения черного тела при температуре T ; λ — длина волны; C_1 и C_2 — первая и вторая постоянные излучения.

Решение уравнения (3) дает формулу закона смещения Вина:

$$\lambda_{\text{max}} \times T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ м}\cdot\text{К}, \quad (4)$$

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

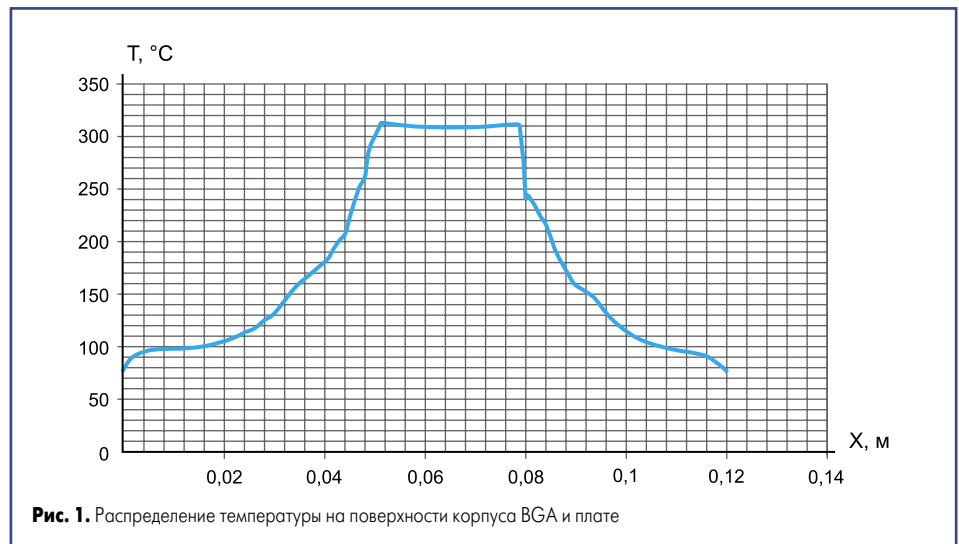


Рис. 1. Распределение температуры на поверхности корпуса BGA и плате

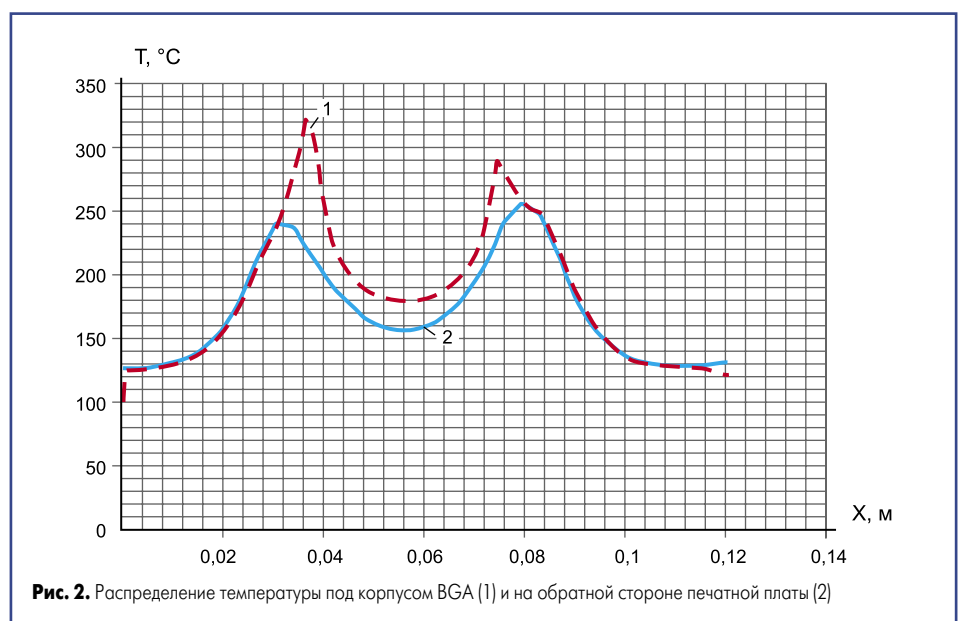


Рис. 2. Распределение температуры под корпусом BGA (1) и на обратной стороне печатной платы (2)

Аналогично излучению от твердых поверхностей моделируется излучение тепла в расчетную область от расположенных в среде границ расчетной области. В результате для каждой участвующей в инфракрасном теплообмене поверхности определяется (с учетом рассчитываемого фактора видимости) разность между входящими и уходящими (то есть отраженными и излучаемыми) радиационными тепловыми потоками. При моделировании влияние среды в теплообмене не учитывается, и некоторые стенки могут быть заданы прозрачными для теплового излучения.

Моделирование теплового нагрева инфракрасным излучением дает в полной мере представление о процессах, происходящих с печатной платой во время разогрева. Основной проблемой при локальном нагреве печатной платы в процессе монтажа (демонтажа) электронных компонентов, особенно многовыводных (μ BGA, QFP и др.), остается возможность перегрева печатной платы и ее механическая деформация. Этого можно избежать при использовании подогрева обратной стороны печатной платы [6].

Для моделирования процесса инфракрасного нагрева в CosmosFloWorks необходимо задать начальные и граничные условия.

Граничными условиями являются значения интенсивности источника инфракрасного излучения, параметры излучающих поверхностей (их материалы), контактные условия соприкосновения поверхностей, расстояние от источника нагрева до области нагрева, продолжительность времени нагрева. Начальными условиями являются температура окружающей среды (25 °C), значение гравитации, преобладающие газы и жидкости, давление окружающей среды и скорость потоков.

Материалом излучаемой поверхности инфракрасного нагревателя была керамическая глазурь с излучательной способностью 0,8–0,95 в диапазоне длин волн 2–5 мкм; печатной платы — стеклотекстолит FR-4 со следующими параметрами: модуль упругости при растяжении — 21 000 МПа; коэффициент Пуассона — 1100; коэффициент теплопроводности — 1,7 Вт/м·К; удельная теплоемкость — 0,9 кДж/кг·К; плотность — 1800 кг/м³; разрушающее напряжение при растяжении — 289 МПа.

В результате моделирования нагрева инфракрасным излучением микросхемы в корпусе BGA, установленной на печатной плате из стеклотекстолита FR-4 толщиной 1,5 мм, получено распределение температуры на по-

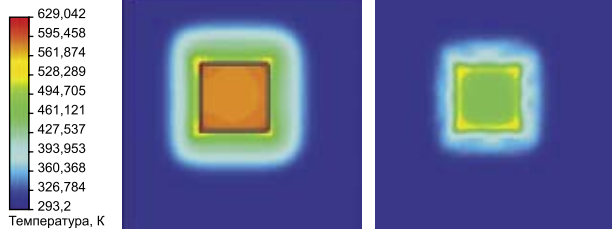


Рис. 3. Распределение поля температуры на поверхности BGA и печатной платы

верхности корпуса BGA, под ней и на обратной стороне печатной платы (рис. 1 и 2). Согласно рисункам максимальное температурное воздействие оказывается на поверхность корпуса микросхемы и прилегающую к ней область. При этом разница между температурой под микросхемой и на ее поверхности составляет 50 °С, что при нарушении режима пайки может привести к возникновению значительного градиента внутренних напряжений, в результате чего может произойти выход микросхемы из строя или нарушение структуры печатной платы.

На рис. 3 изображено распределение температурного поля по поверхности корпуса микросхемы и печатной платы.

Максимальная разница между температурой на поверхности печатной платы и областью нагрева составляет 200 °С, что приведет в процессе монтажа или демонтажа к возникновению большого градиента напряжений и как результат — к деформации печатной платы (рис. 4).

В результате возникновения большой разности напряжений (15–30 МПа) происходит деформация печатной платы, при этом деформируется область не только вокруг микросхемы, но и под ней, что при нарушении тем-

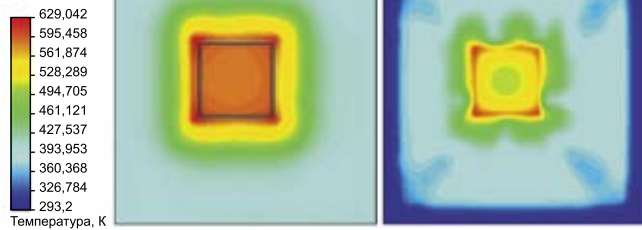


Рис. 5. Температурное поле на поверхности корпуса BGA и печатной платы с применением подогрева

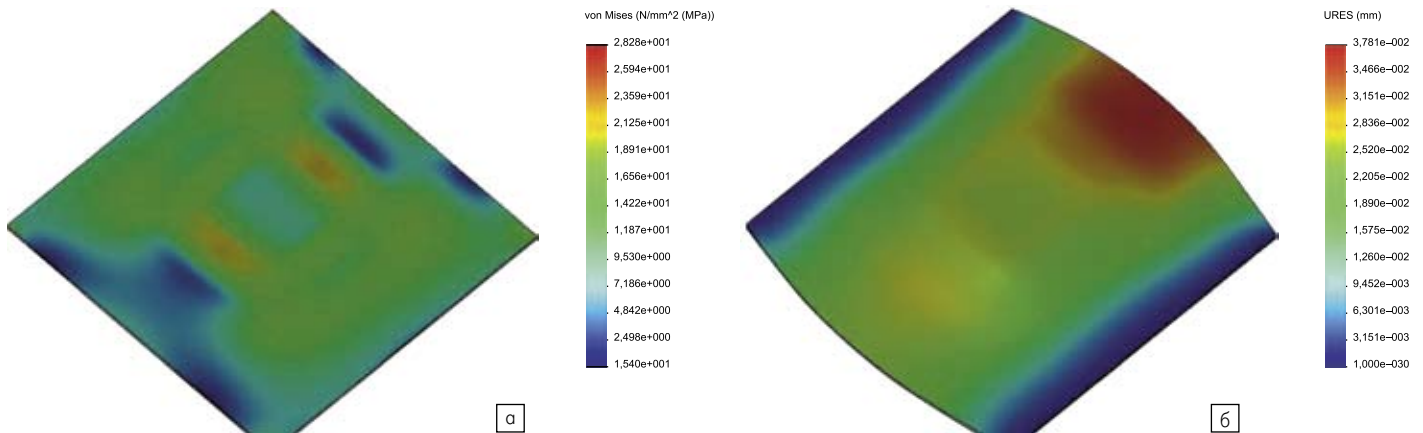


Рис. 4. Распределение напряжений по печатной плате (а) и ее деформация (б)

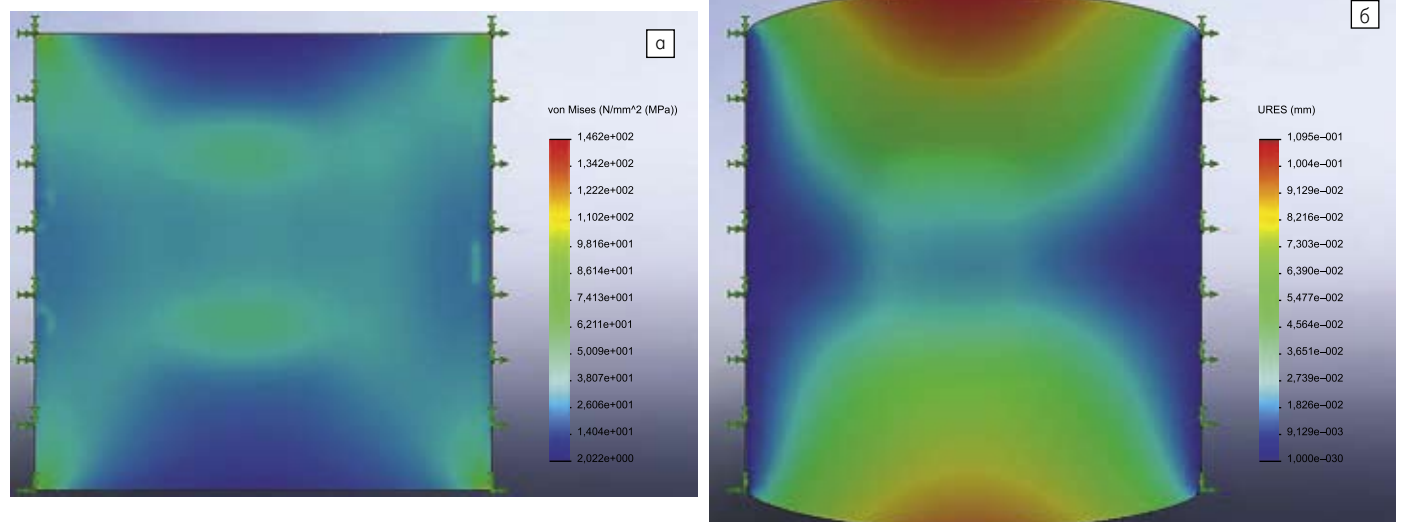


Рис. 6. Распределение напряжений в печатной плате (а) и ее деформация (б) при подогреве

пературного режима пайки может привести к разрушению целостности электрических соединений или непропаю.

Для того чтобы уменьшить градиент напряжений и устранить деформацию печатной платы, применяют двусторонний нагрев с помощью дополнительного нагревателя, который располагается под печатной платой. Температуру нижнего нагревателя устанавливают равной половине температуры основного нагревателя. Анализ температурного поля (рис. 5) в данном случае показывает, что температура корпуса микросхемы изменилась незначительно, однако под ней температура возросла на 130 °С.

С одной стороны, это приводит к увеличению напряжений, возникающих внутри платы, с другой — к сглаживанию градиента напряжений в плате, что устраняет деформацию печатной платы в области монтажа микросхемы (рис. 6). Более наглядно распределение внутренних напряжений в плате представлено на рис. 7 и 8.

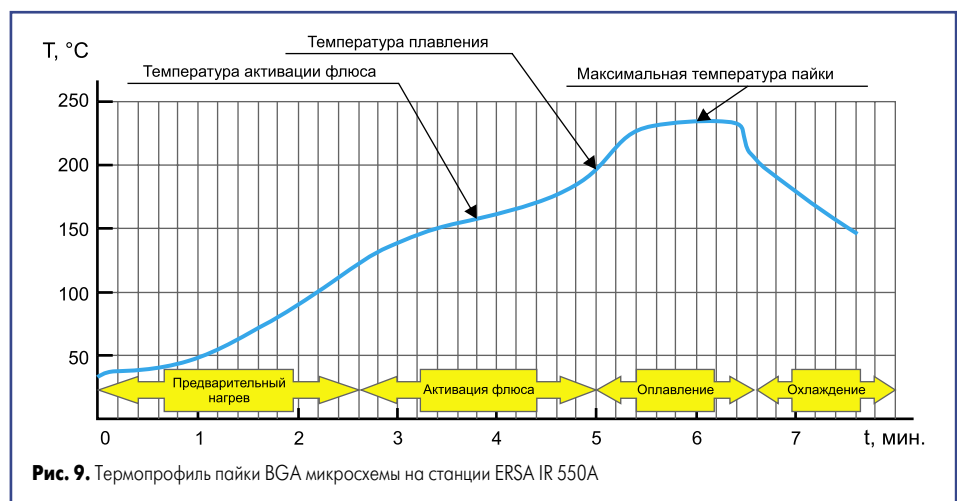
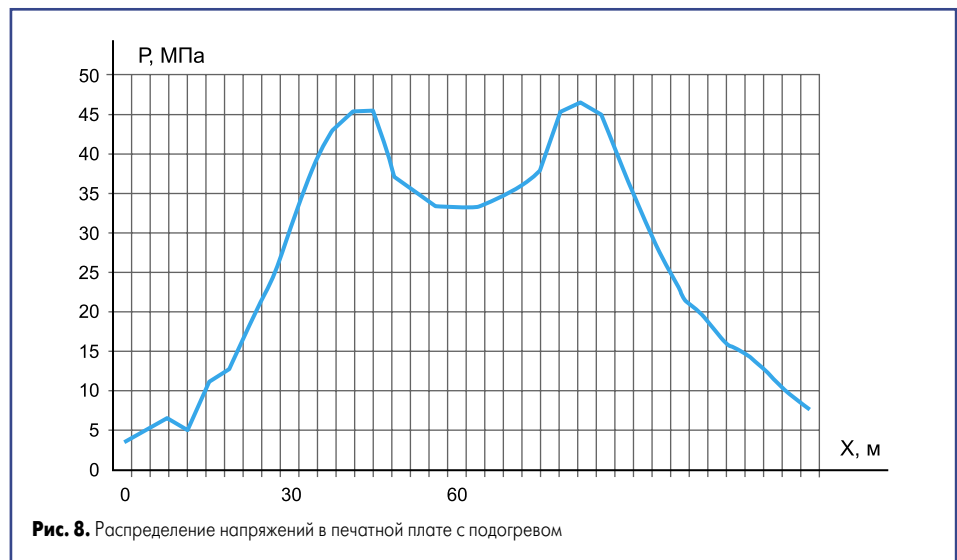
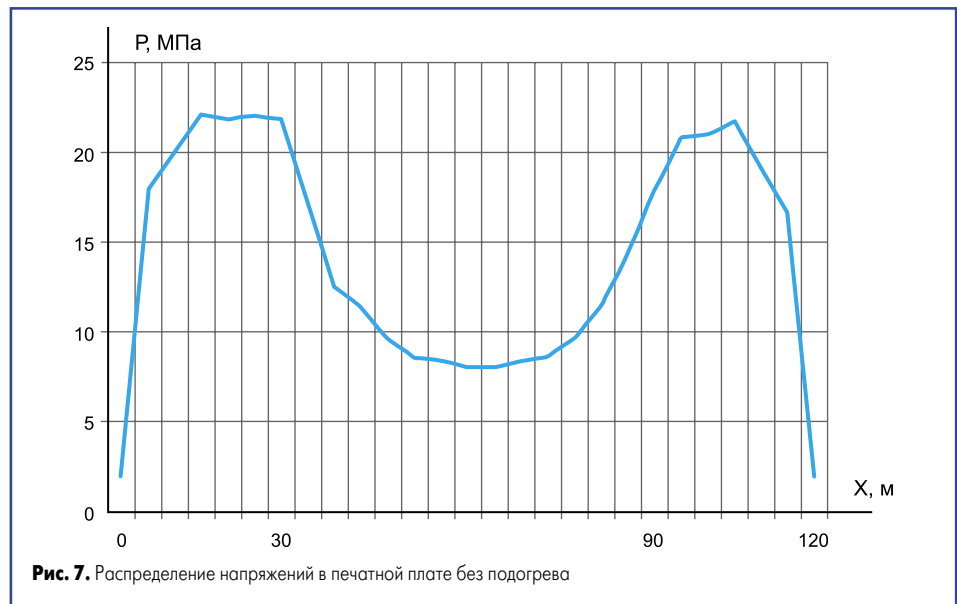
Анализируя распределение напряжений в печатной плате (рис. 7 и 8), можно заметить, что в случае локального нагрева корпуса микросхемы без подогрева печатной платы создается резкий перепад напряжений на ее поверхности, при этом напряжение возрастает неравномерно с 5 до 12 МПа на границе зоны нагрева. При использовании подогрева платы напряжения в ней возрастают равномерно по всей площади, что снижает их градиент и, как следствие, эффект коробления печатной платы.

Результаты моделирования свидетельствуют о необходимости более точного контроля температурного режима при пайке многоярусных микросхем, поскольку перегрев может привести к выводу ее из строя, а также в результате возникновения напряжений в печатной плате может привести к ее короблению и как результат — к нарушению электрических контактов, отслаиванию контактных площадок или смыканию выводов под микросхемой либо непропаю.

При использовании подогрева печатной платы можно избежать этих негативных явлений. В результате подогрева происходит выравнивание температурного профиля на поверхности печатной платы и под ней, тем самым уменьшается градиент температуры в области пайки и по всей площади печатной платы и, как следствие, обеспечивается более равномерное распределение механических напряжений в печатной плате.

Инфракрасное излучение равномерно прогревает поверхность печатной платы и не зависит от воздействия турбулентных и ламинарных воздушных потоков окружающей среды, поскольку воздух прозрачен для излучения, что дает нам возможность с достаточной точностью контролировать температуру, а значит, поддерживать нужный термопрофиль в процессе пайки различных типов многоярусных микросхем.

При пайке микросхемы BGA на печатную плату на инфракрасной паяльной станции ERSA IR 550A получен термопрофиль (рис. 9), близкий к оптимальному.



Этого термопрофиля сложно добиться при использовании конвективной паяльной станции. Этот факт обуславливает рациональность применения инфракрасных паяльных станций в единичном и мелкосерийном производстве и при ремонте сложных электронных модулей.

Для обнаружения дефектных паяных соединений, таких как мостики припоя, отсутствие шариков припоя и неполное оплавление, применена система рентгеновского контроля.

На рис. 10 приведена рентгенофотография паяных соединений BGA микросхемы.

Анализ рентгенограммы показал, что мостики припоя отсутствуют, оплавление шариков припоя произошло равномерно. Благодаря двустороннему нагреву можно избежать критических механических деформаций и дефектов пайки, возникающих в печатной плате в процессе монтажа или демонтажа многоярусных микросхем.

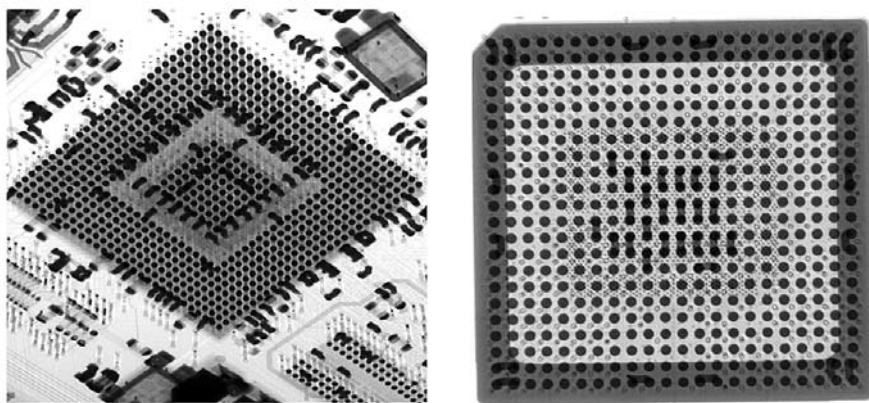


Рис. 10. Рентгенофотография паяных соединений BGA микросхемы

Заключение

При использовании инфракрасного нагрева следует учитывать градиент температуры на поверхности печатной платы, поскольку резкий перепад температуры приводит к возникновению больших механических напряжений в электронном модуле, что в свою очередь приводит к короблению многослойной печатной платы и нарушению целостности токопроводящих слоев. Особенно важно контролировать температуру при бессвинцовой

технологии и при работе с дорогостоящими многовыводными компонентами, в частности BGA микросхемами и многослойными печатными платами.

В результате моделирования оптимизирован процесс инфракрасного теплообмена при монтаже μ BGA микросхемы на многослойную печатную плату. Установлено, что подогрев многослойной печатной платы до половины величины температуры пайки позволяет равномерно распределить напряжения по всей поверхности печатной платы и сгладить их

градиент, что предотвращает деформацию слоев, токопроводящих дорожек и подложки самой микросхемы. Установлено, что оптимальная скорость нагрева печатной платы в процессе пайки составляет 2...4 °C/с, что предотвращает термоудар.

Литература

1. Ланин В. Л., Достанко А. П., Телеш Е. В. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники. Минск: Издательский центр БГУ, 2007.
2. Lau J. H., Lee S.-W. R. Chip Scale Package: Design, Materials, and Applications. N. Y.: McGraw-Hill, 1999.
3. Michinobu I., Takashi K. Thermal Simulation for Predicting Substrate Temperature during Reflow Soldering Process // Proceeding Electronic Components and Technology Conference, 2005.
4. Алямовский А. А., Одинцов Е. В., Собачкин А. А. SolidWorks 2007–2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб., 2008.
5. Крейт Ф., Блек У. Основы теплопередачи. М.: Издательский центр «Мир», 1983.
6. Ланин В. Л., Парковский В. В. Монтаж и демонтаж BGA, CSP, Flip-Chip, QFP // Технологии в электронной промышленности. 2011. № 1.