



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-14-20>

УДК 621.365.53

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА С КОНЦЕНТРАТОРАМИ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

А. Д. ХАЦКЕВИЧ, В. Л. ЛАНИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Получена трехмерная нелинейная математическая модель индукционного нагрева для формирования шариковых выводов по технологии Flip-Chip. Исследование проведено на частотах 300, 732 и 900 кГц при мощности нагрева 20–100 Вт. Применение ферритового сердечника, фокусирующего магнитное поле, и концентратора вихревых токов позволило установить оптимальные термопрофили формирования шариковых выводов для монтажа интегральных схем со скоростью нагрева от 2,0 до 5,5 °С/с. При анализе полученных результатов по итогам экспериментов оптимальным оказался вариант расположения концентратора снизу платы. В этом случае нагрев шариков припоя на выбранных частотах достиг температуры плавления шариковых выводов 230–250 °С, что достаточно для их оплавления.

Ключевые слова: моделирование, индукционный нагрев, Flip-Chip.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Хацкевич, А. Д. Моделирование тепловых полей индукционного нагрева с концентраторами вихревых токов / А. Д. Хацкевич, В. Л. Ланин // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-14-20>.

MODELING OF THERMAL FIELDS IN INDUCTION HEATING WITH EDDY CURRENT CONCENTRATORS

ALEKSANDR D. KHATSKEVICH, VLADIMIR L. LANIN

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A three-dimensional nonlinear mathematical model of induction heating for forming ball terminals using the Flip-Chip technology has been developed. The study was conducted at frequencies of 300, 732, and 900 kHz with a heating power of 20–100 W. The use of a ferrite core focusing the magnetic field and an eddy current concentrator allowed us to establish optimal thermal profiles for forming ball terminals for mounting integrated circuits with a heating rate of 2.0 to 5.5 °C/s. When analyzing the results obtained from the experiments, the option of locating the concentrator at the bottom of the board turned out to be optimal. In this case, heating the solder balls at the selected frequencies reached the melting temperature of the ball terminals of 230–250 °C, which is sufficient for their reflow.

Keywords: modeling, induction heating, Flip-Chip.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Khatskevich A. D., Lanin V. L. (2025) Modeling of Thermal Fields in Induction Heating with Eddy Current Concentrators. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-14-20> (in Russian).

Введение

Технология Flip-Chip представляет собой инновационное решение, позволяющее достичь высокой плотности компоновки электронных компонентов и улучшенных электрических характеристик, что делает ее предпочтительной для создания сложных многоуровневых микроэлектронных модулей. С помощью технологии Flip-Chip обеспечивается прямое соединение контактных площадок чипа и подложки, что исключает необходимость использования проволочных соединений и, как следствие, уменьшает их индуктивность и сопротивление, а также повышает надежность устройства.

Одним из основных преимуществ технологии Flip-Chip является возможность уменьшения габаритов электронных устройств. Благодаря компактности и высокой плотности монтажа Flip-Chip широко используется в мобильных устройствах, высокопроизводительных вычислительных системах, телекоммуникационном оборудовании и автомобильной электронике. В современных смартфонах применение этой технологии позволяет уменьшить энергопотребление, увеличить производительность и улучшить теплоотвод.

Индукционный нагрев как метод формирования шариковых выводов по технологии Flip-Chip имеет ряд уникальных преимуществ. Он обеспечивает высокую скорость нагрева, что минимизирует время воздействия высоких температур на чувствительные компоненты. Это особенно важно для материалов, подверженных термическому повреждению, таких как полимерные подложки или композитные материалы. Более того, индукционный нагрев обеспечивает равномерное распределение температуры в зоне пайки, что критически важно для обеспечения качества и надежности соединений [1].

Использование индукционного нагрева позволяет минимизировать термические напряжения и деформации, возникающие в результате различий коэффициентов теплового расширения между соединяемыми материалами. Это достигается благодаря локализованному воздействию нагрева и возможности точного контроля температурного профиля. Такие характеристики делают метод индукционного нагрева перспективным для применения в условиях, где требуются высокая точность и надежность монтажа.

Современные исследования в области пайки Flip-Chip направлены на улучшение технологий термообработки, разработку новых материалов припоев, а также оптимизацию конструкций контактных соединений. Особое внимание уделяется моделированию и экспериментальным исследованиям, позволяющим глубже понять процессы, происходящие в зоне пайки, и найти пути повышения производительности и качества соединений. Развитие технологии Flip-Chip является ключевым фактором в прогрессе микроэлектронной промышленности и способствует созданию новых поколений устройств с повышенными характеристиками и функциональностью [2]. Исследование методов и технологий пайки Flip-Chip поможет не только понять их роль в современной электронике, но и определить перспективы их дальнейшего использования в условиях постоянно растущих требований к компактности, надежности и производительности [3].

Цель исследований – моделирование тепловых полей при формировании шариковых выводов по технологии Flip-Chip с использованием индукционного нагрева.

Геометрическая модель

Рассматриваемая геометрическая модель представлена в виде индуктора, сверху которого находится печатная плата FR4 толщиной 2,5 мм, а на ее поверхности расположены шарики бессвинцового припоя Sn–3,5Ag–0,5Cu. Над ними помещен медный концентратор с вырезами под шарики толщиной 0,5 мм, шириной и длиной 20 мм (рис. 1). Всю конструкцию охватывает ферритовый магнитопровод в виде кольца с относительной магнитной проницаемостью 2000.

В процессе индукционного нагрева наблюдается скин-эффект, при котором переменный электрический ток высокой частоты концентрируется в поверхностных слоях проводника, уменьшая плотность тока в его глубине. Глубина проникновения характеризует расстояние от поверхности проводника, на котором плотность тока уменьшается в e (константа Эйлера) раз и рассчитывается по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}, \quad (1)$$

где δ – глубина проникновения; μ – магнитная проницаемость, $\mu = \mu_r \mu_0$; μ_r – относительная магнитная проницаемость; μ_0 – магнитная постоянная; σ – электропроводность материала, С/м; ω – угловая частота, $\omega = 2\pi f$; f – частота, Гц.

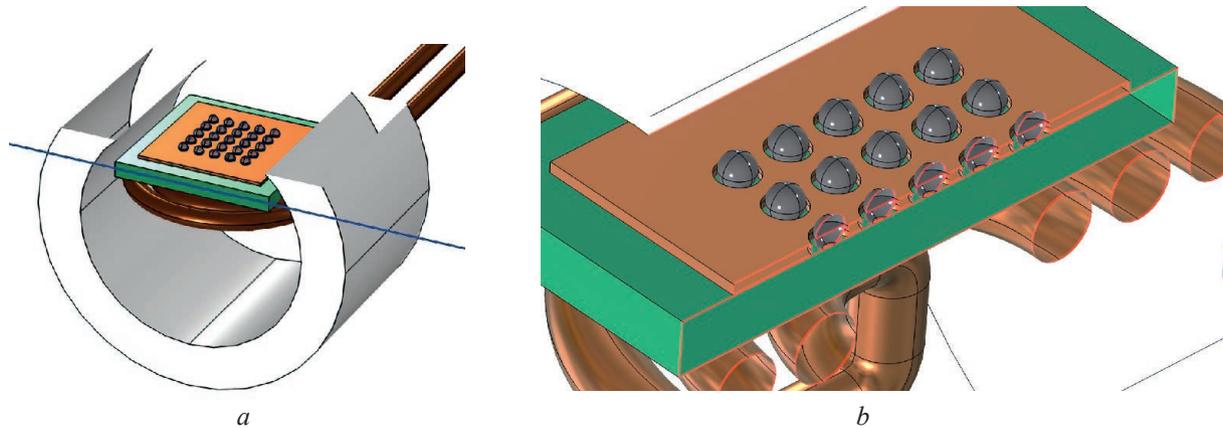


Рис. 1. Геометрическая модель локального индукционного нагрева: *a* – вид сверху; *b* – разрез
Fig. 1. Geometric model of local induction heating: *a* – top view; *b* – section

Глубина проникновения токов высокой частоты при скин-эффекте не должна превышать диаметр шарика припоя, так как это приведет к образованию дефектов при пайке. Для определения диапазона частот индукционного нагрева воспользуемся формулой (1). Типоразмеры шариков припоя выбирались в соответствии со стандартом IPC-7351, который предоставляет общие требования по конструированию контактных площадок и печатных плат с применением технологии поверхностного монтажа для различных компонентов, включая тип корпуса поверхностно монтируемых интегральных микросхем BGA (англ. ball grid array – массив шариков). Данные расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Выбор частотного диапазона индукционного нагрева
Table 1. Selecting the frequency range of induction heating

Диаметр шарика припоя, мм	Диапазон частот
0,760	127 кГц–1 МГц
0,300	806 кГц–1 МГц
0,200	1810 кГц–2 МГц

Моделирование проводилось на частотах 300, 732 и 900 кГц при напряжении на индукторе от 60 до 120 В. Выбор частот обусловлен возможностями ZVS-генератора. Основным критерием являлась температура нагрева шариков припоя, которая должна была быть выше температуры плавления на 20 °С, а для выбранного бессвинцового припоя (Sn–3,5Ag–0,5Cu) она составляла 220 °С.

Математическое моделирование индукционного нагрева

Моделирование индукционного нагрева включало решение уравнений электромагнетизма и теплопередачи [4]. Процесс нагрева описывается уравнением теплопередачи

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + Q, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала; c_p – удельная теплоемкость; ∇T – градиент температуры; k – коэффициент теплопроводности; Q – количество тепла, выделяемого материалом.

Количество тепла Q , выделяемого материалом, связано с плотностью тока J и определяется по формуле

$$Q = JE, \quad (3)$$

где E – напряженность электрического поля.

Условие Дирихле в электромагнитной задаче оказывает влияние на распределение токов и, следовательно, на тепловыделение, а также может задавать граничные условия электромагнитного поля, что влияет на температуру в моделируемом объекте:

– граничные условия:

$$A|_{\Gamma} = g(\Gamma); \quad (4)$$

– условие Дирихле:

$$\frac{\partial A}{\partial n}|_{\Gamma} + f(\Gamma)A|_{\Gamma} = h(\Gamma), \quad (5)$$

где A – искомая функция; $\frac{\partial A}{\partial n}|_{\Gamma}$ – нормальная производная функции A на границе Γ (условие Неймана); $A|_{\Gamma}$ – значение функции A на границе Γ (условие Дирихле); $h(\Gamma)$ – функция, задающая граничное условие внешнего теплового потока.

Для корректного решения задачи индукционного нагрева в модели необходимо связать решения электромагнитных и тепловых уравнений. Алгоритм моделирования представлен на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм моделирования электромагнитных и тепловых полей локального индукционного нагрева

Fig. 2. Algorithm for modeling electromagnetic and thermal fields of local induction heating

Проведение эксперимента

Моделирование тепловых полей проводилось в программном пакете COMSOL Multiphysics. На первом этапе была получена модель тепловых полей (рис. 3) в шариках припоя без применения концентратора вихревых токов. Анализ модели показал, что в данной конфигурации шарики припоя греются неравномерно, разница между самой горячей и холодной точками составляет около 100 °С, что не допустимо при формировании шариковых выводов. А в случае использования конфигурации с медным концентратором и ферритовым сердечником происходит равномерное распределение температуры в зоне формирования шариковых выводов.

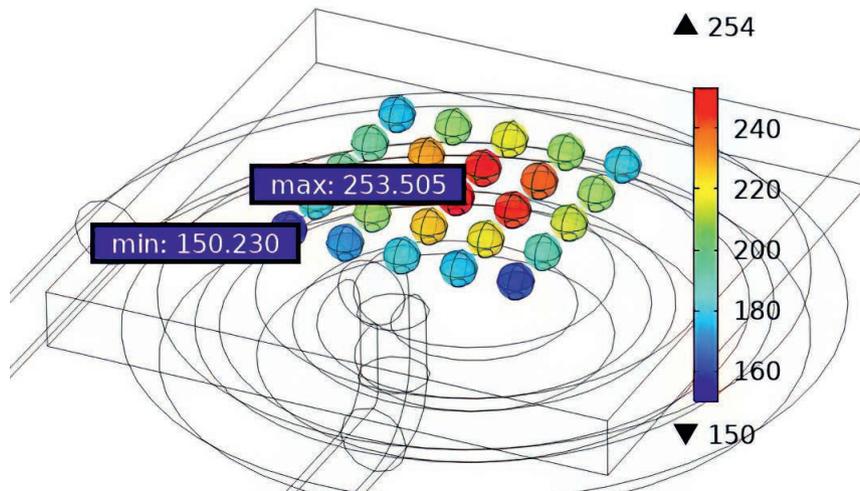


Рис. 3. Температурные поля без использования концентратора на частоте 732 кГц
Fig. 3. Temperature fields without using a concentrator at a frequency of 732 kHz

Следует отметить, что при варианте, когда концентратор располагался сверху, происходил его перегрев, а температура шариков припоя оставалась недостаточной для их оплавления. Температура шариков на частоте 300 кГц достигала 100 °С, при этом температура концентратора превышала 370 °С на 40-й секунде нагрева. На частотах 732 и 900 кГц температура шариков достигала примерно 80–100 °С при нагреве концентратора на 40-й секунде до 200–250 °С. При креплении концентратора на плату снизу отмечался значительный его нагрев до 300 °С. Однако при этом на частоте 300 кГц температура шариков припоя составляла около 230–250 °С, и происходило их оплавление. Тепловые поля с вариантом размещения концентратора на плате снизу представлены на рис. 4.

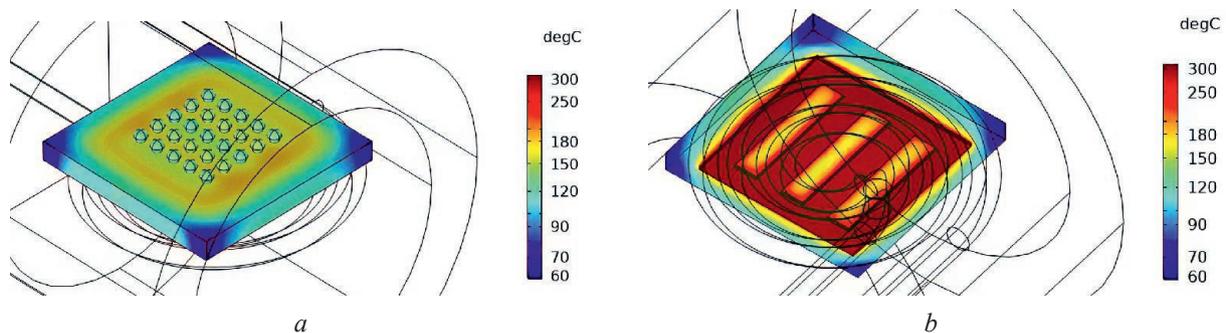


Рис. 4. Тепловые поля при креплении концентратора на плату снизу: *a* – вид сверху; *b* – вид снизу
Fig. 4. Thermal fields when mounting the concentrator on the board from below:
a – top view; *b* – view from below

При анализе температуры шариков припоя применялась интегральная оценка сразу для всех шариков на плате. На рис. 5 представлены зависимости температуры шариков припоя от времени нагрева на частотах 300, 732 и 900 кГц при напряжении на индукторе 60 В в случае расположения концентратора снизу платы, на рис. 6 – зависимости температуры концентратора от времени нагрева на тех же частотах.

При индукционном нагреве без ферритового кольца и концентратора шарики припоя не нагреваются до температуры плавления. Вариант крепления концентратора сверху на печатной плате с вырезами под шариками приводит к перегреву концентратора, при этом температура шариков припоя не превышает 100 °С при 300 кГц и 80–100 °С при 732 и 900 кГц соответственно. Оптимальный вариант – расположение концентратора снизу платы, поскольку в этом случае нагрев шариков припоя на частотах 300, 732 и 900 кГц достигает температуры плавления 230–250 °С, что достаточно для их оплавления.

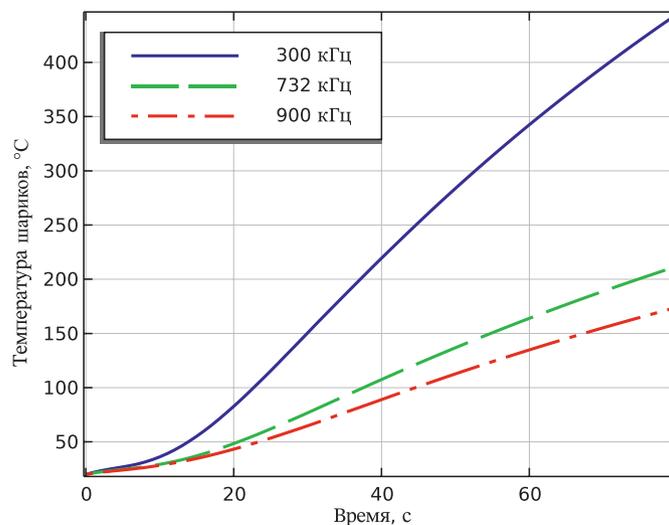


Рис. 5. Зависимость температуры шариков припоя от времени нагрева при расположении концентратора снизу платы

Fig. 5. Dependence of solder ball temperature on heating time when the concentrator is located at the bottom of the board

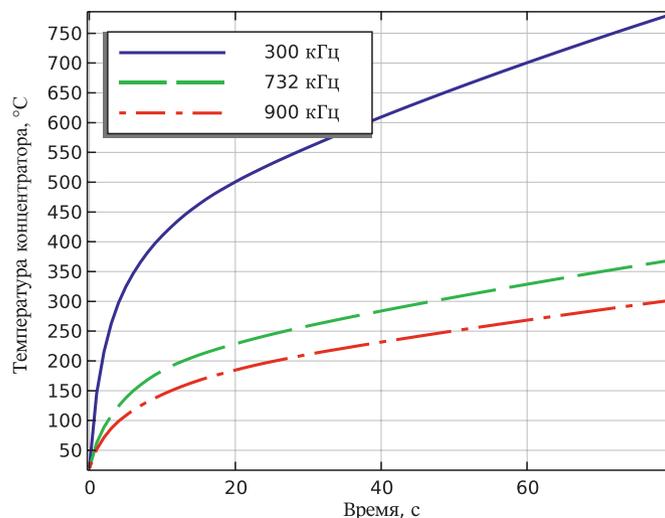


Рис. 6. Зависимость температуры концентратора, расположенного снизу платы, от времени нагрева

Fig. 6. Temperature dependence of the concentrator located at the bottom of the board on heating time

Заключение

Разработанная трехмерная нелинейная модель тепловых полей индукционного нагрева при технологии Flip-Chip позволила оптимизировать процесс оплавления шариков припоя при их закреплении на контактных площадках платы. Для повышения эффективности индукционного нагрева проводилась фокусировка магнитного поля индуктора, что увеличило скорость нагрева до 2,0–5,5 °C/с в диапазоне частот 300–900 кГц при мощности нагрева до 100 Вт. Расположение концентратора снизу под печатной платой позволяет осуществить равномерный ее нагрев.

Список литературы / References

1. Baker J., Smith R., Johnson P. (2021) Advances in Induction Heating for Electronics Assembly. *Journal of Microelectronics Manufacturing*. 34 (3), 123–134.
2. Kim Y., Lee H., Park S. (2020) Thermal Management in Flip Chip Bonding: Challenges and Solutions. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 43 (5), 789–798.

3. Xu L., Zhang W., Chen Q. (2019) Innovations in Flip Chip Soldering Technologies. *Microelectronics International*. 36 (4), 245–257.
4. Hongbo Xu, Mingyu Li, Yonggao Fu, Ling Wang, Jongmyung Kim (2009) Local Melt Process of Solder Bumping by Induction Heating Reflow. *Soldering and Surface Mount Technology*. 25 (4), 45–54.

Поступила 01.04.2025
Received: 1 April 2025

Принята в печать 11.05.2025
Accepted: 11 May 2025

Вклад авторов

Хацкевич А. Д. осуществил численное моделирование процесса индукционного нагрева, включая разработку математической модели, верификацию расчетных методов и анализ полученных результатов.

Ланин В. Л. в качестве научного руководителя сформулировал постановку задачи, предложил ключевые направления исследования, а также обеспечил научно-методологическое сопровождение работы на всех этапах ее выполнения.

Authors' contribution

Khatskevich A. D. carried out numerical modeling of the induction heating process, including the development of a mathematical model, verification of calculation methods and analysis of the obtained results.

Lanin V. L. as a scientific supervisor formulated the problem statement, proposed key areas of research, and also provided scientific and methodological support for the work at all stages of its implementation.

Сведения об авторах

Хацкевич А. Д., исследователь, магистр техн. наук, ассист. каф. электронной техники и технологии, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Ланин В. Л., д-р техн. наук, проф. каф. электронной техники и технологии, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 652-50-30
E-mail: dvpodt94@mail.ru
Хацкевич Александр Дмитриевич

Information about the authors

Khatskevich A. D., Researcher, M. of Sci. (Tech.), Assistant at the Department of Electronic Engineering and Technology, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Lanin V. L., Dr. Sci. (Tech.), Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 652-50-30
E-mail: dvpodt94@mail.ru
Khatskevich Aleksandr Dmitrievich