

УДК 621.365.511

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОДНОВИТКОВОГО ИНДУКТОРА  
ДЛЯ ЗАКАЛКИ СФЕРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ СРЕДСТВАМИ  
ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА FLUX*****Н.Н. Клочкова, А.В. Обухова, А.Н. Проценко***Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассматривается моделирование азимутального одновиткового индуктора для поверхностной закалки заготовки сферической формы. Получена модель индукционной установки. Модель учитывает нелинейную зависимость различных теплофизических свойств материалов, а именно теплопроводность, теплоемкость и удельное электрическое сопротивление от температуры. На основе модели определен базовый конструктивный параметр установки – угол наклона индуктора, а также рассчитаны параметры режима нагрева, обеспечивающие достижение его требуемых кондиций. Показана возможность получения требуемой равномерности нагрева в индукторе рассматриваемой конструкции. В качестве результатов приведено распределение температуры по поверхности, по радиусу и по экватору сферы.*

**Ключевые слова:** *индукционный нагрев, многопараметрический анализ, электромагнитные и тепловые поля, метод конечных элементов.*

При нагреве заготовок для последующей обработки необходимым условием чаще всего является равномерность распределения температуры [1]. Для обработки давлением (прессование, штамповка, прокатка) необходимо равномерно нагреть деталь по всему объему. При закалке необходимо равномерно нагреть закаливаемую поверхность на некоторую глубину. Требуемое распределение температуры при индукционном нагреве, как правило, достигается с помощью соответствующего распределения плотности индуцированного тока по поверхности заготовки и ее изменения во времени в процессе нагрева, для чего необходим индуктор специальной формы и соответствующий режим нагрева. Поэтому существенным моментом в проектировании индукционной установки является выбор конструкции индуктора и воздушного зазора между его внутренней рабочей частью и поверхностью нагреваемого изделия. Сложная форма деталей вызывает дополнительные проблемы при нагреве. Сложными для индукционного нагрева оказываются детали с острыми углами и поверхностями с сильной кривизной в нескольких направлениях, в частности сферические поверхности.

В данной статье представлено решение задачи по определению конструктивных параметров индукционной установки и режима нагрева сферы в одновитковом индукторе.

Одним из вариантов конструкции индуктора для нагрева сферической поверхности может быть индуктор чашеобразной формы [2]. Однако, во-первых,

---

*Наталья Николаевна Клочкова (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Алла Васильевна Обухова (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Александр Николаевич Проценко (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

нельзя с уверенностью сказать, что распределение тока по проводнику такой сложной формы будет равномерным, во-вторых, равномерное распределение плотности тока в поверхностном слое нагреваемой заготовки можно обеспечить только изменением величины зазора. Такой способ регулировки практически невозможен при указанной форме индуктора.

От перечисленных недостатков свободен азимутальный трубчатый одновитковый индуктор с вращающейся заготовкой. Такой индуктор состоит из витка, расположенного под некоторым углом к горизонтальной плоскости.

Равномерность нагрева в таком индукторе может достигаться с помощью соответствующего выбора частоты тока, величины воздушного зазора, ширины или радиуса витка, угла наклона витка и скорости вращения заготовки.

Успешное решение задачи проектирования такого индуктора возможно только при наличии подробной и точной трехмерной модели. Такую модель можно построить средствами программного пакета Flux, который позволяет построение трехмерных моделей объектов практически любой сложности [3, 4] и проведение многопараметрического анализа электромагнитных и тепловых полей методом конечных элементов.

В рассматриваемом случае параметрами целесообразно назначить в первую очередь частоту индуктора, то есть глубину проникновения тока в сталь нагреваемой заготовки и в медь индуктирующего проводника. В качестве параметров будут рассматриваться также: радиус сферы, радиус индуктора, угол наклона плоскости витка индуктора относительно горизонтальной плоскости, высота геометрического центра индуктирующего витка относительно центра сферы, внешний диаметр трубки индуктирующего проводника, внутренний диаметр трубки индуктирующего проводника.

Один из важных аспектов модели рассматриваемой индукционной системы – вращение сферы. В среде Flux для этого необходимо заключить нагреваемую сферу в сфероид, образующая которого представляет собой ломаную линию из нескольких прямолинейных участков (рис. 1). Вращение такого сфероида возможно. Назначенные сфероиду и сфере одинаковые кинематические параметры обеспечат возможность вращения сферы.

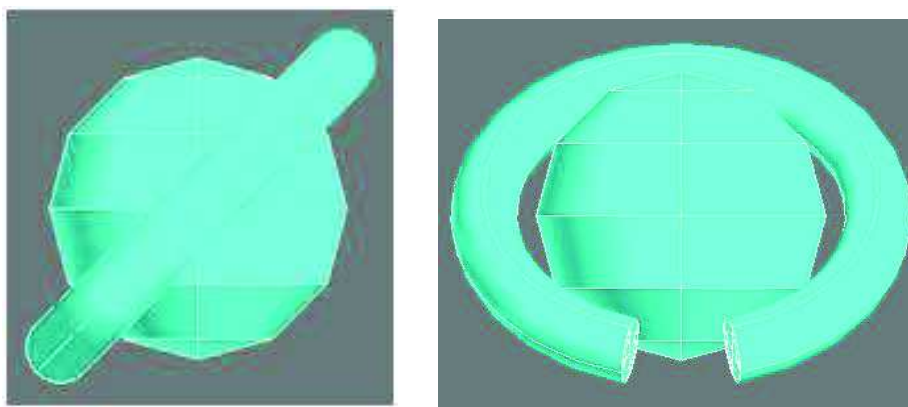


Рис. 1. Геометрическая модель сферы, заключенной в сфероид, и индуктора

В соответствии с рекомендациями [4] на глубине проникновения тока сетка конечных элементов должна быть прямоугольной, и не менее двух элементов по толщине слоя. Однако такая сетка в зоне полюсов образует группу треугольных элементов с «плохими пропорциями» [1, 4], то есть с углом при вершине меньше

15°. Такие элементы плохо просчитываются и тем самым значительно снижают точность расчетов.

Для исключения подобной ситуации в области полюсов создаются специальные зоны [5]. Конечно-элементная сетка в этих зонах строится с использованием треугольных элементов. Это позволяет повысить точность расчетов за счет правильной структуры сетки.

Для построения прямоугольной сетки конечных элементов скин-слоя используется генератор сетки типа Mapped, в остальных областях треугольная сетка строится генератором типа Automatic (рис. 2).

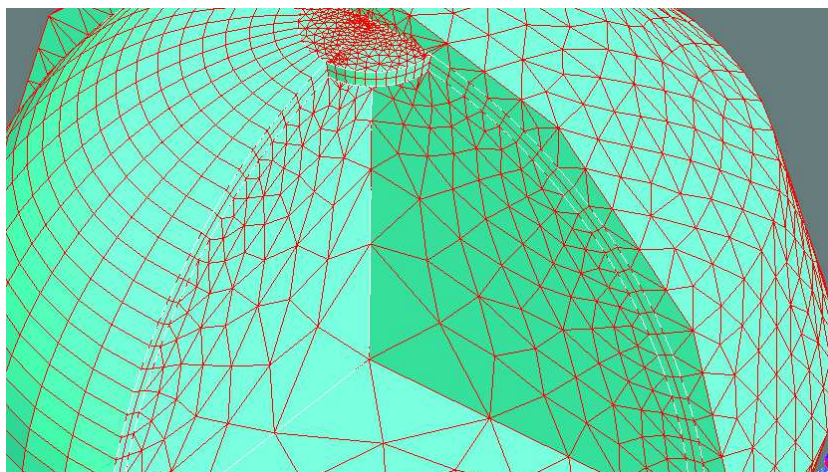


Рис. 2. Окончательный вид сфероид и сферы с сеткой конечных элементов

Для физического описания модели используется трехмерная квазистационарная электромагнитная задача переменного тока, объединенная с задачей нестационарной теплопроводности (3D Steady State AC Magnetic coupled with Transient Thermal application) [2]. В этом случае для решения сформулированной задачи используются следующие уравнения:

$$\operatorname{rot}(v_0[v_r]\operatorname{rot}(\bar{A})) + [\sigma]\left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \operatorname{grad}V\right) = 0;$$

$$\operatorname{div}(-[k]\operatorname{grad}T) + \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = q,$$

где  $[v_r]$  – удельное магнитное сопротивление;  $v_0$  – удельное магнитное сопротивление вакуума  $v_0=1/\mu_0=1/(4\pi 10^{-7})$ , м/Гн;  $\bar{A}$  – магнитный векторный потенциал Вб/м;  $[\sigma]$  – удельная электрическая проводимость, См;  $V$  – электрический скалярный потенциал, В;  $k$  – теплопроводность, Вт/м<sup>2</sup>°С;  $T$  – температура, °С;  $\rho C_p$  – объемная теплоемкость, Дж/м<sup>3</sup>°С;  $t$  – время, сек;  $q$  – функция источников тепла.

Расчетная область представляется в виде двух вложенных параллелепипедов. Внутренний объем представляет основную расчетную область, а внешний объем – зону перехода в бесконечность. Благодаря этому удовлетворяются противоречивые требования – моделирование бесконечности с помощью ограниченного объема.

Как известно, при индукционном нагреве на результирующее температурное поле нагреваемого изделия влияет зависимость свойств материала от напряженности магнитного поля и температуры.

Вследствие взаимосвязи и взаимовлияния свойств материала и условий окружающей среды точное представление свойств и законы их изменения могут оказаться очень сложным. Как правило, невозможно выразить всю сложность законов поведения в одной модели, которая бы одновременно учитывала различные свойства. Поэтому при построении математических моделей сложных объектов обычно используют упрощения.

Известно, что учет нелинейностей значительно усложняет решение задачи. В частности, при использовании численных методов это выражается в увеличении требуемой оперативной памяти ЭВМ и многократном увеличении времени счета.

Для сравнения, был проведен расчет нескольких задач с учетом нелинейности различных свойств стали посредством программного пакета Flux (см. таблицу).

Задачи решались со следующими параметрами:

- частота тока 20 кГц;
- напряжение на индукторе 10 В;
- контроль положения вращающейся сферы по углу поворота;
- пределы изменения угла поворота сферы: 0°, 90°;
- шаг изменения угла поворота 30°.

#### Результаты сравнения различных задач учета нелинейностей свойств стали

Свойство	Модель нелинейности	Время решения, сек
Электросопротивление	Линейная	6824
	Экспоненциальная	7352
Теплопроводность	Линейная	7778
	Экспоненциальная	9787
Теплоемкость	Линейная	778
	Экспоненциальная	18774
Все вышеперечисленные свойства	Линейная	1784
	Экспоненциальная	10793

Из таблицы видно, что учет нелинейности свойств нагреваемого материала в виде любой функции из приведенных в таблице позволяет получать результаты в течение рабочего дня, поэтому далее расчеты выполнялись с учетом экспоненциальной зависимости свойств от температуры.

Дальнейшие вычислительные эксперименты проводились с целью определения оптимальных (рациональных) конструктивных параметров индукционной системы и параметров процесса нагрева.

Общий уровень температуры определяется в первую очередь напряжением на индукторе и продолжительностью процесса нагрева. Для закалки необходимо нагреть до требуемой температуры только тонкий поверхностный слой, поэтому процессы индукционной закалки, как правило, непродолжительны. Очевидно, что в таких условиях равномерность нагрева в одновитковом индукторе зависит от скорости вращения нагреваемой детали.

Следовательно, для достижения требуемой температуры необходимо правильно определить напряжение на индукторе, а также скорость вращения для обеспечения равномерности нагрева и количество оборотов сферы, т. е. время нагрева.



На равномерность результирующего температурного поля также влияет угол наклона плоскости витка индуктора. Очевидно, крайние положения индуктора, вертикальное и горизонтальное, дают максимальную неравномерность нагрева, а некоторое промежуточное положение обеспечит максимально достижимую равномерность. Поэтому в ходе вычислительного эксперимента определялось также положение индуктора.

В результате проведенного вычислительного эксперимента в качестве рациональных определены следующие значения исследуемых параметров режима нагрева:

- напряжение на индукторе 26 В;
- угол наклона индуктора 35°;
- скорость вращения сферы 400 об/мин;
- время нагрева 0,6 сек (4 оборота).

Распределение температуры в конце процесса нагрева с указанными параметрами представлено на рис. 3–4.

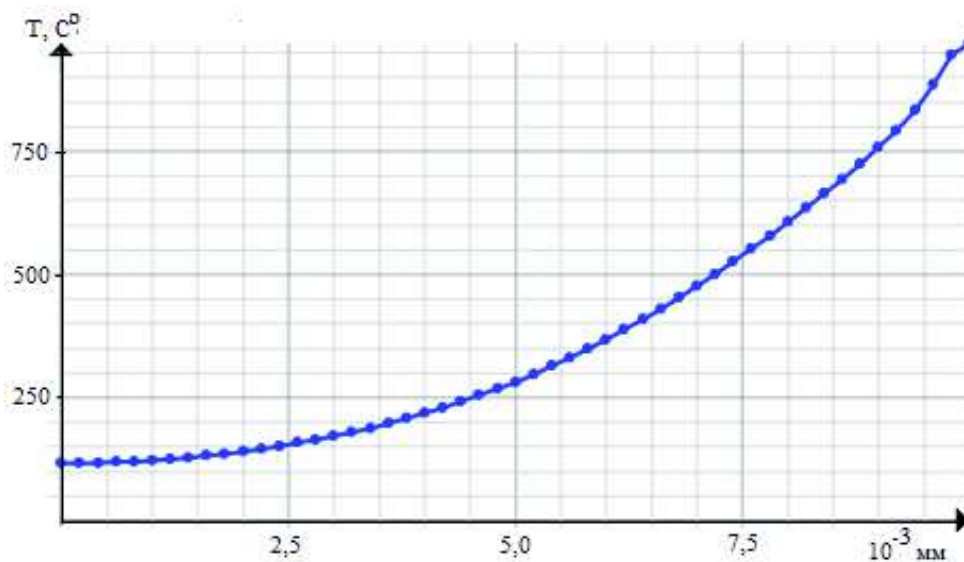


Рис. 3. Распределение температуры по радиусу сферы.  $T_{\min}=118 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\max}=968 \text{ }^{\circ}\text{C}$

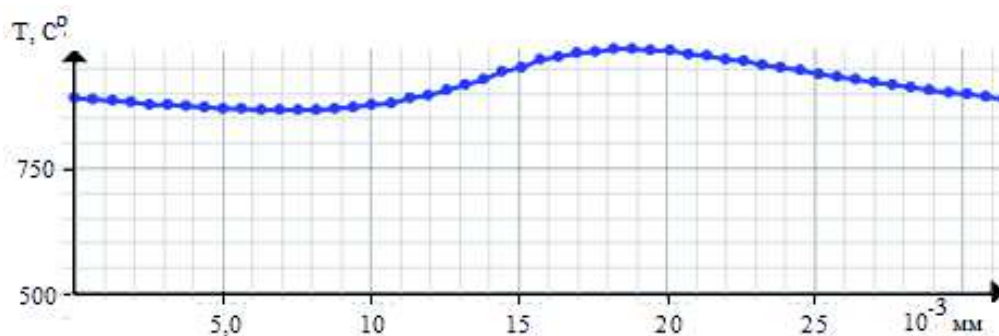


Рис. 4. Распределение температуры по экватору сферы.  $T_{\min}=867 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\max}=989 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Таким образом, была получена модель индукционной установки для нагрева сферических деталей под закалку. На основе модели определен базовый конструктивный параметр установки – угол наклона индуктора, а также рассчитаны параметры режима нагрева, обеспечивающие достижение его требуемых кондиций.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сидоренко В.Д.* Применение индукционного нагрева в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1980. – 231 с.
2. *Фризен В.Э.* Моделирование индукционного нагрева с помощью программы Elcut 4.21: Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Методы расчета электромагнитных и тепловых полей». – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2003. – 27 с.
3. *Шарапова О.Ю.* Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 7 (28). – С. 180–185.
4. *Baake E., Blinov K., Korshikov S., Sharapova O.* Numerical simulation of multi-physics dynamic processes in induction heating systems granted by German Academic Exchange Service (DAAD). Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Труды XII Международной конференции. 21-23 июня 2010, Самара. – Самара: Самарский НЦ РАН, 2010. – С. 88–92.
5. *Брятов А.С., Ключкова Н.Н., Обухова А.В., Проценко А.В.* Моделирование индукционной установки специального назначения средствами программного пакета Flux // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 2 (79). – С. 57–64.

*Статья поступила в редакцию 13 апреля 2016 г.*

## THE USE OF THE SOFTWARE PACKAGE FLUX IN THE DESIGN OF SINGLE-TURN INDUCTOR FOR HARDENING OF SPHERICAL COMPONENTS

*N.N. Klochkova, A.V. Obuchova, A.N. Protsenko*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*In this paper the modeling of the azimuthal single-turn inductor for surface hardening of the work piece spherical shape is discussed. Model induction system was obtained. The model takes into account the nonlinear dependence of the various thermophysical properties of materials, namely thermal conductivity, heat capacity and electrical resistivity on temperature. The constructive parameters namely the angle of inclination of the inductor and parameters of the heating mode, ensuring the achievement of the required heating conditions were defined. The possibility of obtaining the desired heating uniformity in the inductor of such design was shown. The temperature distribution on the surface along the radius line and the equator of the sphere as a result are shown.*

**Keywords:** *induction heating, multivariable analysis, electromagnetic and thermal fields, finite element method.*

---

*Natalia N. Klochkova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

*Alla V. Obuchova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

*Alexander N. Protsenko (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*