

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА НА БАЗЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА FLUX\***

***О.Ю. Шарпова***

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*На базе конечно-элементного программного пакета FLUX создана численная двумерная модель периодического индукционного нагрева. Рассмотрены основные этапы создания модели: построение геометрии, генерация сетки, задание электромагнитных, теплофизических свойств материалов. Представлены некоторые результаты, полученные при расчете данной модели.*

***Ключевые слова:*** численное моделирование, индукционная нагревательная установка периодического действия, граничные условия, теплообмен, конвекция, радиация.

**Введение.** Современное развитие ведущих отраслей тяжелой промышленности неразрывно связано с возрастающим применением электротермических процессов и установок. Сказанное в полной мере относится к процессам индукционного нагрева металла перед последующей обработкой давлением.

Для нагрева черных и цветных металлов перед различными операциями пластической деформации широкое применение находят индукционные нагревательные установки (ИНУ) различных принципов действия. При малой производительности и сравнительно большой длине заготовки часто используют ИНУ периодического действия (рис. 1).

ИНУ периодического действия являются сложными техническими объектами, в которых протекают физические процессы электромагнитной и тепловой природы. В общем случае математическое описание таких объектов представляет собой систему нелинейных дифференциальных и интегральных уравнений, записанных для многомерных и многосвязных областей. Если не вводить существенных упрощений в постановку задачи, то решение указанной системы уравнений, а следовательно, и количественное описание изучаемого объекта могут быть получены только численными методами [1]. Современные численные методы и вычислительные технологии, используемые при моделировании процессов индукционного нагрева, подробно описаны в специальной литературе [2, 3].

К настоящему времени наибольшее распространение при решении дифференциальных уравнений получили численные методы конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ) [4].

Современные технологии конечно-элементного анализа реализуются в программных пакетах высокого уровня. Одним из специализированных программных продуктов, предназначенных для многопараметрического электромагнитного, теплового и электромеханического анализа, является пакет FLUX, разработанный французской компанией Cedrat [5].

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.» (проект П1448).

*Ольга Юрьевна Шарпова – аспирант.*

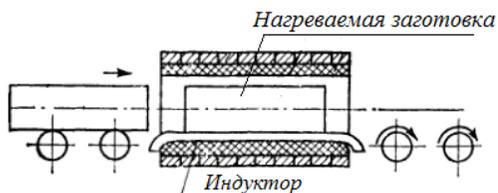


Рис. 1. Схема ИНУ периодического действия

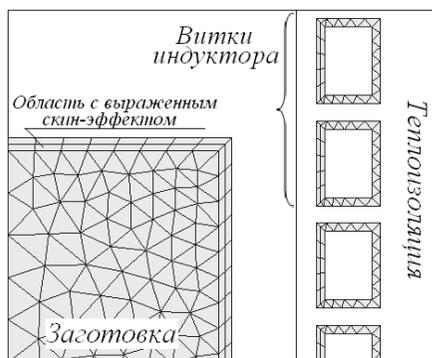


Рис. 2. Сетка заготовки и витков индуктора

Программный пакет FLUX предоставляет пользователю возможность моделирования статических, гармонических и переходных режимов, включая механическую и электрическую привязку к модели. Многопараметрический решатель FLUX позволяет вычислять и оптимизировать конфигурации при изменении геометрических и схемных параметров, а также материалов.

Широкие возможности экспорта, интерфейс с MATLAB Simulink и другими симуляторами выделяют FLUX среди программных пакетов, основанных на МКЭ.

Многопараметрические методы симуляции и интерфейсные возможности, реализованные в программном пакете FLUX, представляют значительный интерес для моделирования ИНУ.

Основные этапы численного моделирования процесса индукционного нагрева металла на базе программного пакета FLUX: задание исходных данных в предпроцессоре, численное решение в процессоре, обработка результатов в постпроцессоре.

Для ИНУ, представленной на рис. 1, необходимые исходные данные приведены в таблице.

#### Исходные данные для численного моделирования ИНУ

Длина индуктора, мм	1046
Заданная температура заготовки, °С	1250
Температура окружающей среды, °С	20
Начальная температура заготовки, °С	20
Частота питающего тока, Гц	2300
Число витков	42
Внутренний диаметр катушки индуктора, мм	145
Геометрические параметры витка, мм	15×20
Расстояние между витками, мм	4
Диаметр заготовки, мм	105
Материал заготовки	Сталь (С45)

**Работа в предпроцессоре программного пакета FLUX.** На первом этапе моделирования строится геометрия, генерируется сетка и задаются физические свойства в окне предпроцессора FLUX. Ввиду симметричности рассматриваемой ИНУ относительно обеих осей целесообразно построить  $\frac{1}{4}$  часть от всей модели.

Строится модель с помощью единичных геометрических объектов (точки, линии). Точки задаются координатами (в миллиметрах) и соединяются линиями, обра-

зую поверхности. Заканчивается построение геометрии заданием конечной области, ограничивающей окружающее пространство.

После того, как геометрические параметры заготовки, индуктора и окружающего пространства заданы, переходим к построению сетки. Сетка окружающего пространства должна иметь наибольшую плотность вблизи заготовки и витков индуктора (в этой области наибольшая плотность магнитного потока).

При разбиении заготовки учитывается скин-эффект, для этого на ее поверхности

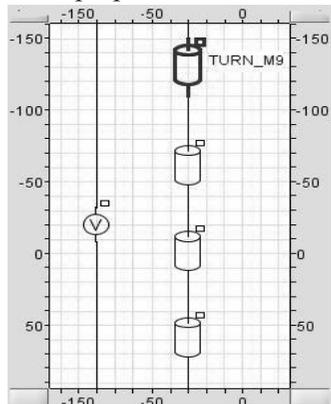


Рис. 3. Фрагмент электрической схемы

задается специальная область, ширина которой должна превышать глубину проникновения тока (рис. 2). В результате описанных операций была сгенерирована сетка, состоящая из 3-угольных элементов, а в области с выраженным скин-эффектом используются 4-угольные элементы.

Для описания электромагнитных, теплофизических свойств материалов и задания граничных условий был выбран электромагнитный тепловой модуль. За основу в нем берутся установившиеся электромагнитные и переходные тепловые процессы.

Конструкция модели разбивается на 24 части, каждая из которых имеет свои электромагнитные и тепловые свойства: заготовка, 21 виток катушки, теплоизоляция, окружающее пространство. Для задания свойств воздуха и меди была использована стандартная библиотека материалов. Свойства стали задавались вручную, при этом были учтены зависимости магнитной проницаемости, удельного сопротивления, теплопроводности и удельной теплоёмкости от температуры.

Особенностью пакета FLUX является возможность создания электрических схем. На рис. 3 представлен фрагмент электрической схемы, которая соответствует моделируемой ИНУ.

Последний этап – задание граничных условий. Для этого всей поверхности заготовки присваивается имя CON\_RAD и в соответствующем диалоговом окне задаются коэффициенты лучистого и конвективного теплообмена.

**Численное решение поставленной задачи в процессоре FLUX.** После завершения работы с препроцессором FLUX новый проект сохраняется, при этом автоматически создаются файлы с расширением INDHEAT.FLU, INDHEAT.TRA. Первый файл содержит всю информацию о геометрии, сетке, физических свойствах модели. Он запускается препроцессором для того, чтобы изменять, модифицировать разработанную модель. Второй файл необходим для дальнейшего численного решения. При запуске решателя считывается файл INDHEAT.TRA, после этого процессор готов к проведению численных расчетов.

Для запуска расчета необходимо задать временной шаг, время расчета, количество шагов, начальную температуру и температуру окружающей среды.

При описании физики процесса был выбран за основу электромагнитный тепловой модуль. На основе результатов электромагнитного анализа программа осуществляет тепловой расчет на каждом временном шаге. Точность расчета магнитной и тепловой задачи задана по умолчанию, но ее значение можно изменять.

**Обработка результатов в постпроцессоре программного пакета FLUX.** Результатом работы решателя FLUX являются два файла с именами INDHEAT\_M.TRA, INDHEAT\_T.TRA. Они создаются автоматически и предназначены для дальнейшей обработки в постпроцессоре.

Файл INDHEAT\_M.TRA содержит всю информацию о поведении магнитного поля, об изменении в течение времени электромагнитных свойств материалов.

Рассмотрим возможности постпроцессора FLUX на конкретных примерах и проанализируем полученные результаты. Для данного расчета напряжение источника питания составляет 470 В при частоте 2300 Гц и длительности нагрева 557 с. Выведем на экран распределение плотности магнитного потока (рис. 4).

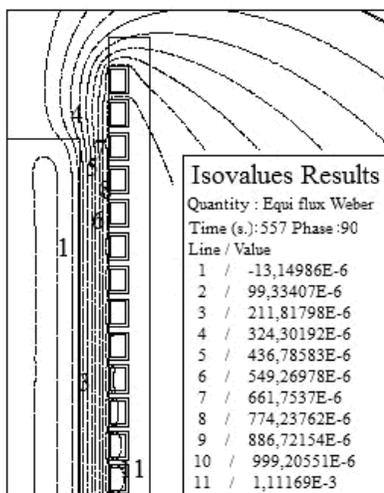


Рис. 4. Распределение плотности магнитного потока

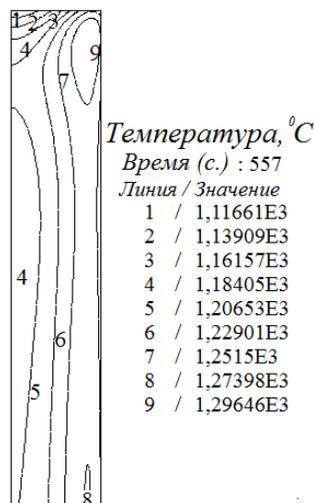


Рис. 5. Распределение температурного поля заготовки

Магнитный поток изображается в виде линий (изолинии). Такое представление наглядно демонстрирует, как и с какой плотностью изменяется магнитный поток в пространстве. Каждой изолинии соответствует свое значение магнитного потока, при этом ей присваивается порядковый номер (рис. 4).

Наибольший порядковый номер – 11 имеет изолиния, проходящая через поперечное сечение катушек индуктора, значение магнитного потока здесь максимальное –  $1,1 \cdot 10^{-3}$  Вб.

Через воздушный зазор проходит несколько изолиний (4-9), при этом значение магнитного потока изменяется от  $886,7 \cdot 10^{-6}$  до  $324,3 \cdot 10^{-6}$  Вб. На поверхности заготовки магнитный поток принимает минимальное значение  $99,3 \cdot 10^{-6}$  Вб, что соответствует изолинии со вторым порядковым номе-

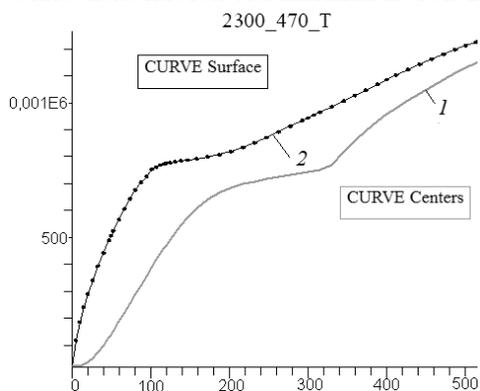


Рис. 6. Температурное поле в процессе нагрева заготовки; 1 – в центре заготовки; 2 – на поверхности заготовки

ром. Первая изолиния отвечает за магнитный поток, создаваемый индуцируемым внутри заготовки током. Значение магнитного потока имеет противоположный знак и равно  $13,1 \cdot 10^{-6}$  Вб.

Информация о поведении поля температур и об изменении в течение времени теплофизических свойств материалов содержится в файле INDHEAT\_T.TRA.

Используя широкий круг возможностей постпроцессора FLUX, можно проанализировать пространственно-временное распределение температуры по объему заготовки, применяя различные форматы файлов выхода. На рис. 5 представлено пространственное распределение температурного поля заготовки в конце процесса нагрева. Максимальная температура ( $1296,4$  °С) создается не на поверхности тела, а на некоторой глубине, в зоне источников теплоты (точка с координатами (45; 432)), так как при моделировании был учтен лучистый и конвективный теплообмен с поверхности заготовки. По этой же причине на оси в точке (0; 450) находится ярко выраженный глобальный минимум, значение температуры в котором ( $1116,6$  °С) значительно ниже, чем по всему объему заготовки (средняя температура  $1250$  °С).

Прогрев центральной части заготовки более равномерный. На рис. 6 представлена зависимость изменения температуры во времени в процессе нагрева в точках (0; 0) и (50; 0). Как видно из графика, температурное отклонение между поверхностью заготовки и ее центром не превышает  $70$  °С. В момент времени  $t=100$  с характер нагрева заготовки меняется из-за температурной зависимости магнитной проницаемости материала (переход через точку Кюри).

**Выводы.** В среде наукоемкого расчетного программного комплекса FLUX была разработана численная двумерная модель индукционной нагревательной установки периодического действия. При моделировании рассматриваемого процесса были учтены следующие факторы:

1. зависимость теплофизических свойств материала заготовки от температуры и от неравномерности магнитного поля;
2. все способы теплопередачи: проводимость, конвекция и радиация;
3. совместное решение электромагнитной и тепловой задач.

Разработанная двумерная модель позволяет выявлять основные физические закономерности поведения температурных полей и анализировать распределение температуры как по радиусу, так и вдоль оси цилиндрического слитка конечной длины. Данная модель может быть использована в оптимизационных процедурах как для решения задач оптимального управления многомерными температурными полями в процессе периодического индукционного нагрева, так и для оптимального проектирования ИНУ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
- Handbook of Induction Heating / Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black M., Marcel Dekker Inc., New York, 2003.
- Rapoport E., Pleshivtseva Yu. Optimal Control of Induction Heating Processes. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Ration, London, New York, 2007.
- Сегерлинд Л. Применение методов конечных элементов. – М: Мир, 1979. – 270 с.  
<http://www.cedrat.com>

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2010 г.

UDC 621.785

## **NUMERICAL SIMULATION OF PROCESS OF PERIODIC INDUCTION HEATING ON THE BASIS OF SOFTWARE PACKAGE PROGRAM FLUX**

***O.Yu. Sharapova***

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

*On the basis of a software package FLUX created a numerical model for periodic two-dimensional induction heating. The main stages of creating the model are considered: the construction of geometry, mesh generation, the task of electromagnetic, thermal properties of materials. Some results obtained in the calculation of this model.*

***Keywords:*** numerical simulation, induction heater of batch operation, boundary conditions, heat transfer, convection, radiation.