

На правах рукописи



ГЛЕБОВ Алексей Олегович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕРМОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов – 2014

Работа выполнена на кафедре «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Карпушкин Сергей Викторович

Официальные оппоненты: **Холоднов Владислав Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Системный анализ» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»,
Арзамасцев Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерное и математическое моделирование» ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ивановский государственный химико-технологический университет»

Защита состоится 25 декабря 2014 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.07 при Тамбовском государственном техническом университете по адресу: г. Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1, ауд. 160.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, ФГБОУ ВПО «ТГТУ», ученому секретарю совета Д 212.260.07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «ТГТУ» <http://tstu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

С.Я. Егоров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема проектирования технической системы с улучшенными технологическими характеристиками рассматривается на примере прессов для изготовления резинотехнических изделий (РТИ) и термообработки металлических деталей. Известно, что качество продукции, выпускаемой на данном оборудовании, определяется степенью равномерности температурного поля в объеме изделий и зависит от конструкции термонагруженных элементов прессового оборудования – нагревательных плит и прессформ. В настоящее время на производстве ставится задача получения равномерных температурных полей на рабочих поверхностях нагревательных плит. Считается, что такие плиты обеспечивают равномерный прогрев прессформ и изделий и могут использоваться для выпуска продукции широкого ассортимента.

В современных плитах используется, как правило, индукционный вид нагрева ввиду его надежности и простоты автоматизации. Однако при высоких рабочих температурах целесообразнее применение омических нагревателей.

Для исследования термонагруженных элементов технической системы, предназначенной для изготовления РТИ и термообработки металлических деталей, необходимо рассматривать комплекс электрических, магнитных и тепловых процессов. При этом особую сложность представляет учет нелинейных характеристик материалов плит и нагревателей.

Вопросы моделирования тепловых процессов в термонагруженных элементах прессового оборудования и задачи расчета устройств индукционного нагрева рассматривались в работах А.Б. Кувалдина, В.Б. Демидовича, Е.Н. Малыгина, С.В. Карпушкина, J.-L. Coulomb, K. Muramatsu, N. Takahashi, A. Canova, D.P. Labridis.

В связи с вышеизложенным разработка математических моделей тепловых процессов в термонагруженных элементах прессового оборудования и вычислительных методов их исследования является актуальной.

Работа выполнялась в рамках Государственного контракта №02.740.11.0624 «Методы, алгоритмы и программное обеспечение разработки виртуальных моделей технических объектов для обучения специалистов и создания прикладных информационных систем» в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Целью работы является разработка численных методов, алгоритмов и программ расчета температурных полей термонагруженных элементов прессового оборудования и изделий, в том числе с учетом автоматической стабилизации температуры, для минимизации перепадов температур на рабочих поверхностях нагревательных плит и в объеме изделий.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

- разработать математические модели электромагнитных и тепловых процессов в одиночных нагревательных плитах прессов;
- разработать алгоритм решения математической модели индукционного нагрева плит;
- осуществить формализованную постановку задачи оптимизации конструктивных характеристик нагревательной плиты;
- разработать алгоритм решения задачи оптимизации;
- разработать математическую модель нагрева системы «плита – пресс-форма – изделие» в режиме автоматической стабилизации температуры;
- разработать эффективные численные методы расчета температурных полей системы «плита – пресс-форма – изделие» в режиме автоматической стабилизации температуры.

Объектом исследования в работе являются электромагнитные и тепловые процессы нагрева прессового оборудования.

Предметом исследования являются математические модели процесса нагрева прессового оборудования с учетом автоматической стабилизации температуры, алгоритмы решения уравнений модели и оптимизации конструктивных характеристик прессового оборудования.

Методы исследования. В работе использовались методы математического моделирования, оптимизации, планирования эксперимента, а также метод конечных элементов (МКЭ).

Научная новизна.

1. В результате комплексного исследования проблемы электрического нагрева термонагруженных элементов технической системы разработана математическая модель электромагнитных и тепловых процессов, отличающаяся использованием дифференциальных уравнений электромагнитного поля для расчета тепловыделений от вихревых токов.

2. С применением технологии вычислительного эксперимента на математической модели ферромагнитного тела, основанной на нелинейных двумерных уравнениях электромагнитного поля, разработана методика определения магнитной проницаемости ферромагнитных материалов, позволяющая свести нелинейную задачу расчета поля вихревых токов к линейной.

3. Реализован эффективный численный метод решения уравнений математической модели нагрева термонагруженных элементов технической системы с учетом автоматической стабилизации температуры, позволяющий сократить время расчета в среднем с 30 до 4 часов за счет разработанных алгоритмов определения переменного шага по времени в МКЭ без потери точности по отношению к решениям с постоянным шагом.

4. Разработан и протестирован эффективный численный метод определения коэффициента эффективности излучения омических нагревателей, позволяющий учитывать наличие недиатермических тел произвольной фор-

мы в системе передачи тепла за счет расчета суммарного теплового потока на тепловоспринимающей поверхности нагреваемого тела с помощью МКЭ.

Практическая значимость.

1. Предложена методика расчета температурных полей РТИ в процессе их вулканизации на прессе с плитами индукционного нагрева, применение которой позволило сформулировать рекомендации по оптимизации конструкции плит и пресс-форм для изготовления различных некрупногабаритных РТИ.

2. На основе комплексного анализа стационарных и нестационарных тепловых процессов в РТИ выявлены параметры, изменение которых оказывает определяющее влияние на температурные поля РТИ различных конструкций: для более простых РТИ – параметры системы обогрева, для более сложных РТИ – конструкция пресс-форм.

3. Произведена оптимизация конструкции промышленной индукционной нагревательной плиты вулканизационного пресса, позволившая уменьшить перепад температур по рабочей поверхности с 15,7 до 7,6 К.

4. Получены эмпирические уравнения для определения магнитной проницаемости ферромагнитной стали 45 в зависимости от магнитодвижущей силы индуктора с размером паза 25x25 мм.

5. Найдены параметры плиты (мощности и геометрия омических нагревателей, материалы системы обогрева, конфигурация теплоизоляции, параметры регуляторов) пресса для высокотемпературной обработки изделий из металлов при повышенном давлении. Плита прошла апробацию и внедрена на предприятии военно-промышленного комплекса РФ.

6. Экономический эффект от применения разработанных методов и алгоритмов оценивается в 450000 рублей.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Результаты научного исследования соответствуют пунктам 3, 4, 5 паспорта специальности научных работников.

Апробация работы. По результатам исследования сделан ряд докладов на – Международных конференциях: «Математические методы в технике и технологиях» (Пенза, 2011; Волгоград, 2012; Нижний Новгород, 2013; Тамбов, 2014), «Информатика: проблемы, методология, технологии» (Воронеж, 2012; Воронеж, 2014), «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» (Тамбов, 2013); – Всероссийских конференциях: «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» (Тамбов, 2009; Тамбов, 2010), «Информационные и социальные технологии в современном обществе» (Липецк, 2010), «Проведение научных исследований в области информационно-телекоммуникационных технологий» (Москва, 2010).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ; из них 4 статьи в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ; 11 тезисов

докладов на международных и всероссийских конференциях; 2 статьи в журналах, входящих в реферативные базы ISI Web of Science и Scopus; 1 монография; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, приложений и библиографического списка из 111 наименований. Объем диссертационной работы составляет 156 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи научного исследования, представлены пункты научной новизны и практической значимости полученных результатов, приведена структура диссертации.

В первой главе рассмотрена конструкция вулканизационных прессов, проведен сравнительный анализ различных методов нагрева плит. Показано, что для проведения вулканизации наиболее перспективно применение индукционного нагрева. Для высокотемпературных плит (250-550°C) целесообразнее использовать омические нагреватели.

Проведен обзор существующих методов теплового расчета нагревательных плит. Отмечены главные недостатки, характерные для используемых методов расчета индукционных нагревательных устройств: 1) применение эмпирических зависимостей при расчете тепловыделений от вихревых токов; 2) использование упрощенных математических моделей процесса индукционного нагрева, не позволяющих учитывать нелинейные характеристики ферромагнитных материалов; 3) аппроксимация геометрии термонагруженных элементов телами канонической формы.

Расчет омических нагревателей затрудняется отсутствием справочных данных о коэффициенте эффективности излучения нагревателя, размещенного внутри стального паза.

Рассмотрены вопросы автоматической стабилизации температуры нагревательных плит по двухпозиционному и пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) законам. Показано, что основная трудность тепловых расчетов с учетом автоматической стабилизации вызвана отсутствием надежных алгоритмов, отличающихся высоким быстродействием.

Сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе представлена математическая модель процесса индукционного нагрева одиночной плиты вулканизационного пресса.

Любое электромагнитное поле описывается системой дифференциальных уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J};$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t};$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho_{Ve};$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0;$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H};$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E},$$

где $\mathbf{H}$ – напряженность магнитного поля, А/м;

$\mathbf{J}$ – плотность тока, А/м²;

$\mathbf{E}$ – напряженность электрического поля, В/м;

$\mathbf{B}$ – магнитная индукция, Тл;

t – время, с;

$\mathbf{D}$ – электрическая индукция, Кл/м²;

ρ_{Ve} – объемная плотность электрических зарядов, Кл/м³;

μ – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;

ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м.

Поскольку длина электромагнитной волны при промышленной частоте тока значительно превышает размеры нагревательной плиты, то плотностью тока смещения можно пренебречь, т.е. $\partial \mathbf{D} / \partial t = 0$. В индукционных устройствах электрические заряды правомерно считать нулевыми. Приняв данные допущения, исходную систему уравнений Максвелла можно свести к двум уравнениям:

$$\operatorname{rot}(\mu^{-1} \operatorname{rot} \mathbf{A}) + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{ext}; \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{A}$ – векторный потенциал электромагнитного поля, Вб/м;

$\mathbf{J}_{ext}$ – плотность тока, подводимого от внешнего источника, А/м²;

γ – удельная электрическая проводимость, Ом⁻¹м⁻¹.

Векторный потенциал электромагнитного поля связан с магнитной индукцией следующим выражением:

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}. \quad (3)$$

Полная плотность тока определяется суммой внешних и вихревых (индуцированных) токов:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{ext} + \mathbf{J}_{ind}; \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_{ind} = -\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (5)$$

Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов определяется кривой намагничивания $B = f(H)$:

$$\mu = \frac{B}{H}. \quad (6)$$

Для решения системы уравнений (1)-(2) плотность тока внешнего источника, свойства материалов, а также значения векторного магнитного потенциала на границах должны быть известны. Если расчетную область представить в виде шара радиусом R , то граничное условие на сферической поверхности можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(x, y, z) &= 0; \\ x^2 + y^2 + z^2 &= R^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Граничные условия в области контакта индукторов и нагревательной плиты:

$$\begin{aligned} (\mathbf{H}_{pl}(x, y, z) - \mathbf{H}_{in}(x, y, z)) \times \mathbf{n}_{in.pl} &= 0; \\ (\mathbf{B}_{pl}(x, y, z) - \mathbf{B}_{in}(x, y, z)) \cdot \mathbf{n}_{in.pl} &= 0; \\ x, y, z &\in \Omega_{in.pl}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\mathbf{n}_{in.pl}$ – единичный вектор нормали к поверхности контакта, направленный из области индуктора в область плиты, м^{-1} ;

$\Omega_{in.pl}$ – область контакта индуктора и плиты.

Аналогичным образом записываются граничные условия для области контакта нагревательной плиты и окружающего воздушного пространства.

Распределение плотности тока внешнего источника зависит в общем случае от величины тока индукторов I и их конструктивных характеристик Γ :

$$\mathbf{J}_{ext} = f\left(I_i, \Gamma^{(i)}\right), i = 1, \dots, n_{ind}, \quad (9)$$

где n_{ind} – число индукторов нагревательной плиты.

Модуль усредненной плотности тока индукторов может быть вычислен по формуле:

$$J_{ext_i} = \frac{\omega_i I_i}{s_{ind_i} h_{ind_i}}, i = 1, \dots, n_{ind}, \quad (10)$$

где ω_i – число витков i -го индуктора;

s_{ind_i} , h_{ind_i} – ширина и глубина поперечного сечения паза i -го индуктора соответственно, м.

Направление тока может быть задано с помощью базисных векторов системы координат и определяется вектором конструктивных характеристик, который в случае прямоугольного индуктора имеет вид:

$$\Gamma = \{d_{cond}, \omega, x_c, y_c, l_x, l_y, s_{ind}, h_{ind}\},$$

где d_{cond} – диаметр провода, м;

x_c, y_c – координаты центра индуктора, м;

l_x, l_y – длина и ширина индуктора соответственно, м.

Процесс распространения тепла в плите описывается нестационарным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{q}{c\rho}, \quad (11)$$

где T – температура, К;

q – удельное тепловыделение, Вт/м³;

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

ρ – плотность, кг/м³;

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности, м²/с;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Среднее за период тепловыделение от вихревых токов в установившемся режиме определяется по закону Джоуля-Ленца:

$$q = f \int_{t_{st}}^{t_{st} + \frac{1}{f}} \frac{j^2}{\gamma} dt, \quad (12)$$

где f – частота тока, Гц;

t_{st} – условное время начала установившегося режима электромагнитных процессов, при котором не происходит значительных изменений амплитудных значений плотности тока, с.

Начальное условие для уравнения (11):

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (13)$$

Теплоотдача от внешних поверхностей неизолированной нагревательной плиты описывается граничными условиями третьего рода:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Omega_{pl}} = \alpha_r (T - T_0), \quad (14)$$

где α_r – коэффициент теплоотдачи от поверхности нагревательной плиты под номером r .

Для плиты омического типа тепловыделения также определяются по закону Джоуля-Ленца. При допущении о равномерном выделении тепла в объеме паза под нагреватель расчет тепловыделений ведется по формуле:

$$q(x, y, z) = \begin{cases} \frac{I_i^2 R_i}{v_{hi}}, & \text{если } (x, y, z) \in v_{hi}, i = 1, \dots, n_h; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (15)$$

где R_i – электрическое сопротивление i -го нагревателя, Ом;

v_{hi} – объем, в котором выделяется мощность i -го нагревателя, м³;

n_h – число нагревателей.

Для расчета температурного поля нагревательных плит в режиме поддержания заданной температуры уравнения математической модели в случае двухпозиционного регулятора необходимо дополнить выражениями (16)–(17):

$$I(t) = \frac{I}{2} \left(1 + (-1)^{I_{sw}(t)+1} \right); \quad (16)$$

$$I_{sw}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } T_{sensor}(t) < T_{down}; \\ 0, & \text{если } T_{sensor}(t) > T_{up}, \end{cases} \quad (17)$$

где $I_{sw}(t)$ – состояние регулятора («1» – включен, «0» – выключен);

$T_{sensor}(t)$ – температура контрольной термопары, °C;

T_{down} , T_{up} – нижний и верхний пороги срабатывания регулятора соответственно, °C.

В случае использования ПИД-регулятора вычисляется его выходной сигнал по формуле (18), который затем преобразуется до требуемого вида (ширины импульса, напряжения и т.д.) в зависимости от типа исполнительного устройства:

$$Y(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (18)$$

где K_P , K_I , K_D – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора соответственно;

$e(t) = T_{set} - T_{sensor}(t)$ – отклонение температуры контрольной термопары от установленного значения T_{set} .

Таким образом, математическая модель процесса индукционного нагрева одиночной плиты вулканизационного пресса с учетом автоматической стабилизации температуры может быть представлена в виде системы уравнений (1)–(14), (16)–(17) или (18); омической плиты – (11), (13)–(15), (16)–(17) или (18).

Для решения уравнений математической модели выбран метод конечных элементов (МКЭ), реализуемый программным комплексом ANSYS. При этом электромагнитный и тепловой анализы осуществляются последователь-

но. В случае необходимости (при изменении свойств материалов в процессе нагрева) процедура электромагнитного анализа повторяется.

Решение нелинейных уравнений (1)-(2) с помощью МКЭ в трехмерной постановке связано с большими затратами машинного времени, обусловленными низкой скоростью сходимости и нестационарностью электромагнитных процессов. Однако если магнитную проницаемость материалов принять постоянной, то при синусоидальности внешнего источника тока уравнение (1) упрощается до линейного квазистационарного в комплексном представлении:

$$\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(\operatorname{rot} \dot{\mathbf{A}}) + j2\pi f \gamma \dot{\mathbf{A}} = \mathbf{j}_{ext}, \quad (1')$$

где j – мнимая единица, $j^2 = -1$.

Расчет тепловыделений в этом случае ведется по формуле

$$q = \frac{|J|^2}{2\gamma}, \quad (12')$$

где $|J| = \sqrt{\operatorname{Re} J^2 + \operatorname{Im} J^2}$ – модуль комплексной амплитудной плотности тока.

Для проверки адекватности модели (1'), (2)-(11), (12'), (13)-(14) использовались данные физического эксперимента №1, который проводился на ОАО «АРТИ-Завод», г. Тамбов, и заключался в измерении температур в пяти точках поверхности плиты индукционного нагрева размером 500×410 мм в процессе ее разогрева. Кроме того, фиксировались показания контрольной термопары. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчета приведено на рис. 1 для контрольной термопары. Среднее отклонение между результатами составило 2,6 К (относительное отклонение 0,7 %). Постоянное значение магнитной проницаемости, входящее в уравнение (1'), определялось по методике, представленной в третьей главе.

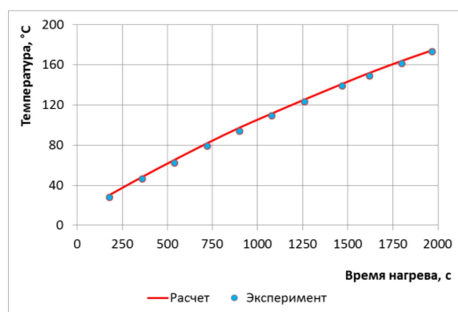


Рис. 1. Сравнение с экспериментом №1

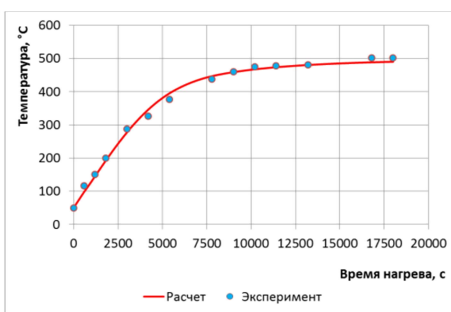


Рис. 2. Сравнение с экспериментом №2

Для проверки адекватности модели (11), (13)-(15) использовались данные эксперимента №2, который проводился на ЗАО «Завод Тамбовполимермаш» и предусматривал измерение температуры в трех точках плиты омического нагрева размером 800×800 мм. Результаты решения задачи (11), (13)-(15) и их сравнение с экспериментальными данными для центральной точки рабочей поверхности плиты приведены на рис. 2. Среднее отклонение между результатами эксперимента и расчетов для омической плиты составило 8,9 К (относительное отклонение 1,7 %).

Из анализа полученных результатов следует вывод об адекватности разработанных математических моделей нагрева индукционной и омической плит.

В третьей главе представлены разработанные методики и алгоритмы для решения уравнений математических моделей.

Решение уравнения (1') не вызывает вычислительных трудностей. Главная сложность при использовании линейного описания электромагнитных процессов состоит в выборе постоянного значения магнитной проницаемости ферромагнитных материалов, эквивалентного кривой намагничивания по выделяемой активной мощности.

Для решения данной задачи проведено исследование влияния различных параметров индуктора на магнитную проницаемость. С помощью вычислительных экспериментов на двумерной осесимметричной модели ферромагнитного диска с размещенным внутри индуктором установлено следующее:

- 1) определяющее влияние на магнитную проницаемость оказывают магнитодвижущая сила (МДС) индуктора и геометрия его поперечного сечения;
- 2) влияние радиуса индуктора незначительно и объясняется «кольцевым эффектом»;
- 3) удаленность индуктора от внешних поверхностей диска отражается на результатах лишь в том случае, если эта величина не превышает удвоенной глубины проникновения электромагнитной волны в рассматриваемое ферромагнитное тело;
- 4) коэффициент заполнения индуктора (доля «чистого» провода в общем объеме паза) при фиксированной величине тока влияет только на тепловыделение самого индуктора вследствие омического нагрева обмотки;
- 5) расположение витков внутри паза, а также наличие или отсутствие зазоров не оказывают влияния на индуцируемые вихревые токи.

Полученные выводы позволили предложить следующую методику определения эквивалентной магнитной проницаемости:

- 1) проведение двумерного электромагнитного нелинейного расчета осесимметричного диска при заданных МДС, параметрах поперечного сечения индуктора и кривой намагничивания;
- 2) вычисление активной мощности системы с использованием (12);
- 3) поиск значения магнитной проницаемости, при котором средние за период активные мощности в линейном и нелинейном расчетах равны.

С использованием разработанной методики для индуктора с наиболее распространенным размером поперечного сечения 25×25 мм построена зависимость магнитной проницаемости от МДС индуктора, имеющая вид степенной функции (см. рис. 3).

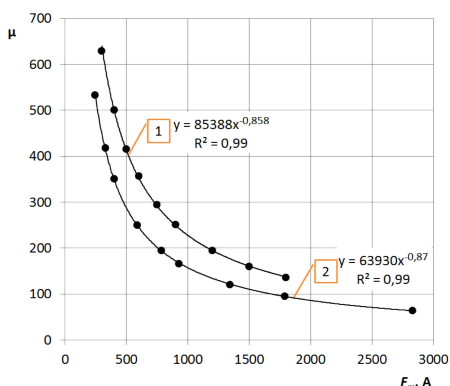


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости от МДС индуктора

1 – при подключении к генератору тока; 2 – при подключении к генератору напряжения

Для экономии машинного времени разработаны алгоритмы определения переменного шага по времени. При двухпозиционном регулировании срабатывание регулятора вызывает резкие изменения тепловых потоков в системе. В эти моменты времени требуется максимальная точность, т.е. минимальный шаг по времени. В дальнейшем шаг может быть увеличен.

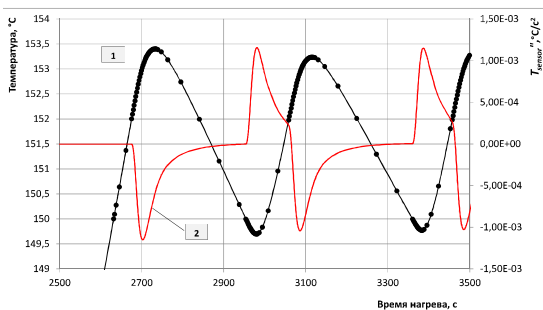


Рис. 4. Иллюстрация работы алгоритма определения переменного шага по времени

1 – температура контрольной термопары; 2 – вторая производная температуры контрольной термопары

Различие кривых, полученных для разных типов подключения индуктора, обусловлено несовпадением коэффициентов мощности в линейном и нелинейном расчетах.

При проведении нестационарного теплового анализа плит прессы, работающих в режиме автоматической стабилизации температуры, наибольшие затруднения вызывает задание шага по времени, значение которого должно позволять адекватно описывать дискретные во времени изменения граничных условий. Завышенные значения шага увеличивают погрешность, а при использовании мелкого шага возрастают затраты времени.

На графиках температуры контрольных термопар изменения тепловых потоков отражаются в виде сильных нелинейностей. Данное свойство заложено в основу работы алгоритма определения переменного шага по времени для двухпозиционного регулятора: значение шага линейно убывает при увеличении второй производной температуры контрольной термопары по модулю (см. рис. 4).

В случае ПИД-регулирования вместо второй производной температуры использована первая производная управляющего воздействия, т.к. именно она определяет изменения тепловых потоков.

Тестирование разработанных алгоритмов на моделях промышленных нагревательных плит, проведенное на компьютере с процессором AMD Phenom II X4 920, показало ускорение расчетов в 7÷10 раз без потери точности по отношению к решениям с постоянным шагом: затраты машинного времени снизились в среднем с 30 до 4 часов. Программная реализация алгоритмов определения переменного шага по времени приведена в приложении на APDL – встроенном языке системы ANSYS.

Во многих случаях расчет омических нагревателей затрудняется отсутствием справочных данных о коэффициенте эффективности излучения, необходимым для определения допустимой поверхностной мощности нагревателя. В случаях диатермической среды между нагревателем и плитой данный коэффициент может быть рассчитан аналитически через средние угловые коэффициенты излучения. При наличии электроизоляторов (например, керамических колец), разделяющих нагреватель и стенки паза плиты, необходимо учитывать процесс теплопроводности внутри колец. Коэффициент эффективности излучения в этом случае предложено определять с помощью численного расчета суммарного теплового потока на тепловоспринимающей поверхности. Разработанный метод отличается универсальностью и может использоваться для расчета недиатермических систем.

В четвертой главе представлены результаты применения разработанных моделей, методик и алгоритмов для решения прикладных задач, а также решения задачи оптимизации конструктивных характеристик индукционной нагревательной плиты, постановка которой сформулирована следующим образом:

Необходимо найти число индукторов n и их конструктивные характеристики (диаметр провода d_{cond} , число витков ω , координаты центра x_c и y_c , ширину паза s_{ind} , глубину паза h_{ind} , длину и ширину l_x и l_y индуктора прямоугольной формы, радиус R_{ind} индуктора круглой формы) такие, что разность между максимальной и минимальной температурами на рабочей поверхности $\Delta = \max T_w - \min T_w$ достигает минимального значения при выполнении условий математической модели (1'), (2)-(11), (12'), (13)-(14), (16), (17) или (18).

Решение задачи оптимизации осложняется большим числом варьируемых переменных и существенными затратами времени на вычисление целевой функции. В связи с этим обосновано применение метода, основанного на теории планирования эксперимента, суть которого заключается в замене сложной целевой функции более простой, поиск минимума которой не вызывает затруднений. На первом этапе проводятся вычислительные эксперименты в соответствии с выбранным экспериментальным планом. Второй этап – аппроксимация целевой функции с помощью метода наименьших квадратов. На третьем этапе производится поиск минимума аппроксимирующей функции.

Проведенные в работе исследования на модели индукционной нагревательной плиты показали, что для аппроксимации целесообразно использовать полином второго порядка. Для реализации серии численных экспериментов выбраны ротatableльный и некомпозиционный трехуровневый план Бокса-Бенкена, т.к. при их использовании получены наилучшие результаты проверочных расчетов для исходной целевой функции.

С помощью теории планирования эксперимента решены задачи оптимизации конструктивных характеристик двух плит: 1) используемой на производстве (рис. 5); 2) предлагаемой конструкции плиты с концентрическим расположением индукторов (рис. 6).

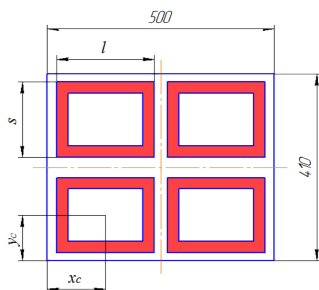


Рис. 5 – Конструкция плиты №1

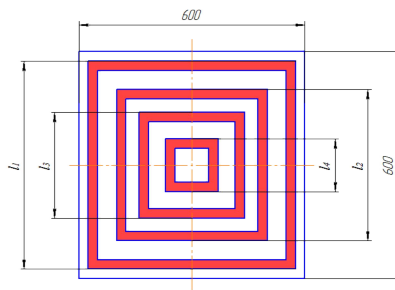


Рис. 6 – Конструкция плиты №2

Варьируемыми переменными (факторами состояния) в задаче оптимизации плиты №1 являлись координаты центров индукторов, их длина, ширина и мощность. Для плиты №2 решалась 8-мерная задача оптимизации: варьировались длины и мощности четырех индукторов. Результаты решения представлены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты решения задачи оптимизации

	До оптимизации		После оптимизации	
	Значения факторов	Перепад температур, К	Значения факторов	Перепад температур, К
Плита №1	$Q = 1250 \text{ Вт}; l = 172 \text{ мм};$ $s = 127 \text{ мм}; x_c = 123 \text{ мм};$ $y_c = 101 \text{ мм}.$	15,7	$Q = 1176 \text{ Вт}; l = 215 \text{ мм};$ $s = 143 \text{ мм}; x_c = 128 \text{ мм};$ $y_c = 100 \text{ мм}.$	7,6
Плита №2	$Q_1 = 3280 \text{ Вт}; Q_2 = 1510 \text{ Вт};$ $Q_3 = 1140 \text{ Вт}; Q_4 = 610 \text{ Вт};$ $l_1 = 521 \text{ мм}; l_2 = 378 \text{ мм};$ $l_3 = 250 \text{ мм}; l_4 = 116 \text{ мм}.$	7,7	$Q_1 = 3280 \text{ Вт}; Q_2 = 1480 \text{ Вт};$ $Q_3 = 1130 \text{ Вт}; Q_4 = 570 \text{ Вт};$ $l_1 = 550 \text{ мм}; l_2 = 400 \text{ мм};$ $l_3 = 280 \text{ мм}; l_4 = 140 \text{ мм}.$	3,6

Приведено решение задачи высокотемпературного (550 °С) нагрева плит, предназначенных для правки и отпуска изделий из металлов при пере-

менных температурах и усилиях прессования. В соответствии с выводами главы 1 выбор способа нагрева был сделан в пользу омического.

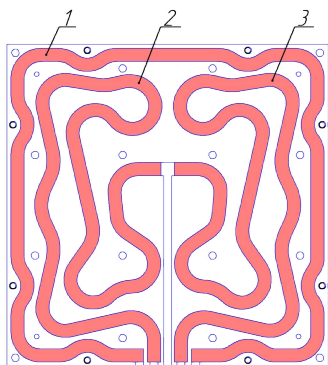


Рис. 7. Размещение омических нагревателей 1-3 плиты высокотемпературного нагрева

Обеспечение равномерного температурного поля на поверхности плиты при высоких рабочих температурах осложняется значительными потерями тепла с боковых поверхностей за счет излучения и конвекции. Поэтому было предложено нагреватель 1 (см. рис. 7) разместить по периметру плиты, управляя его мощностью независимо от двух других (поз. 2, 3) нагревателей. Таким образом, нагреватель 1 выполняет функцию компенсации теплопотерь. Для уменьшения лучистого теплового потока использованы алюминиевые экраны. Расчет омических нагревателей проводился с применением разработанного метода определения коэффициента эффективности излучения. Оптимизация расположения нагревателей

выполнялась с помощью построения улучшающей последовательности методом экспертных оценок.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате комплексного исследования проблемы электрического нагрева термонагруженных элементов прессового оборудования разработана математическая модель электромагнитных и тепловых процессов, позволяющая рассчитывать объемные температурные поля нагревательных плит.

2. Для решения уравнений математической модели индукционного нагрева в линейной постановке с применением технологии вычислительного эксперимента разработана методика определения магнитной проницаемости ферромагнитных материалов, что позволяет сократить объем вычислений примерно на 2 порядка.

3. Разработана программа для ЭВМ, реализующая алгоритмы определения переменного шага по времени, которые позволяют сократить затраты машинного времени примерно с 30 до 4 часов при проведении расчетов температурных полей прессового оборудования с учетом автоматической стабилизации температуры в системе ANSYS.

4. Разработан и протестирован эффективный численный метод определения коэффициента эффективности излучения омических нагревателей, позволяющий рассчитывать допустимую поверхностную мощность нагревателей.

5. На основе комплексного анализа стационарных и нестационарных тепловых процессов в РТИ сформулированы рекомендации для повышения

качества изделий: при вулканизации простых РТИ следует уделять внимание равномерности температурного поля на поверхности плиты, сложных РТИ – конструкции пресс-формы.

6. Применение теоретических результатов работы позволило разработать конструкцию высокотемпературной (550 °С) плиты с омическими нагревателями, которая успешно внедрена на предприятии ВПК РФ.

7. Экономический эффект от применения разработанных методов и алгоритмов оценивается в 450000 рублей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография:

1. Глебов, А.О. Индукционный нагрев элементов прессового оборудования: Моделирование и оптимизация нестационарных тепловых процессов с помощью CAE-систем: монография / А.О. Глебов, С.В. Карпов, С.В. Карпушкин – LAP LAMBERT Academic Publishing, AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG, Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Deutschland / Германия, 2012. – 192 p. ISBN 978-3-659-23828-4.

Статьи в журналах из перечня ВАК:

2. Борисенко, А.Б. Параллельный алгоритм решения трехмерного нестационарного уравнения теплопроводности с использованием явной разностной схемы (на немецком языке) / А.Б. Борисенко, С.В. Карпушкин, А.О. Глебов // Вестник ТГТУ. 2010. Т. 16. № 3. С. 573-577.

3. Карпушкин, С.В. Моделирование устройств индукционного нагрева на примере индукционных нагревательных плит вулканизационных прессов (на английском языке) / С.В. Карпушкин, С.В. Карпов, А.О. Глебов // Вестник ТГТУ. 2011. Т. 17. № 1. С. 110-120.

4. Глебов, А.О. Моделирование температурных полей индукционных нагревательных плит методами конечных элементов и конечных интегральных преобразований / А.О. Глебов, С.В. Карпов, С.В. Карпушкин // Индукционный нагрев. 2012. № 2. С. 19-24.

5. Глебов, А.О. Разработка и исследование математических моделей системы автоматического управления температурой нагревательных плит вулканизационного пресса для изготовления резинотехнических изделий / А.О. Глебов, С.В. Карпов, С.В. Карпушкин, М.Н. Краснянский // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. № 11. С. 33-44.

Статьи в журналах, входящих в реферативные базы ISI Web of Science и Scopus:

6. Ostroukh, A.V. Optimization of design and performance characteristics of heating system of press equipment / A.V. Ostroukh, A.O. Glebov, S.V. Karpov, S.V. Karpushkin, M.N. Krasnyanskiy // American Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 11. № 6. P. 939-946.

7. Glebov, A.O. A comparison of modeling techniques for temperature fields of inductive heating plates / A.O. Glebov, S.V. Karpov, S.V. Karpushkin // Automation and Remote Control. 2014. Vol. 75. № 6. P. 1120-1129.

Другие публикации:

8. Глебов, А.О. Применение системы ANSYS для моделирования устройств индукционного нагрева / Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент. Материалы Всероссийской научно-инновационной конференции. Тамбов, Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2009. С. 266-267.

9. Глебов, А.О. Моделирование индукционного нагрева в среде ANSYS / Информационные и социальные технологии в современном обществе. Материалы III Всероссийской студенческой научно-практической конференции. Липецк, 2010. С. 28-30.

10. Глебов, А.О. Методика трехмерного моделирования индукционного нагрева в среде ANSYS / Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент. Материалы Всероссийской научно-инновационной конференции. Тамбов, Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2010. С. 258-260.

11. Карпушкин, С.В. Виртуальное моделирование температурных полей индукционных нагревательных плит / С.В. Карпушкин, С.В. Карпов, А.О. Глебов / Проведение научных исследований в области информационно-телекоммуникационных технологий. Материалы Всерос. науч.-практ. конф. с элементами научной школы. М., 2010. С. 56-57.

12. Глебов, А.О. Оптимизация алгоритма расчета температурных полей индукционных нагревательных плит / Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24: сб. трудов XXIV Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т. 8. Секция 12. Пенза: Пенз. Гос. Технол. Академия, 2011. С. 93-95.

13. Глебов, А.О. Тестирование методик компьютерного моделирования температурных полей индукционных нагревательных плит / Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XII Международной научно-методической конференции: в 2 т. Т. 1. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2012. С. 99-101.

14. Глебов, А.О. Применение системы ANSYS для оптимизации конструкции индукционных нагревательных плит / А.О. Глебов, С.В. Карпушкин / Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т. 8. Секция 12. Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2012. С. 136-137.

15. Глебов, А.О. Моделирование автоматического регулирования температуры индукционной нагревательной плиты / А.О. Глебов, С.В. Карпушкин / Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26: сб. трудов XXVI Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т. 1. Секции 1, 15. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2013. С. 82-84.

16. Глебов, А.О. Определение магнитной проницаемости ферромагнитных материалов для решения задач индукционного нагрева / Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент. Материалы V Международной научно-инновационной молодежной конференции. Тамбов, 2013. С. 256-258.

17. Глебов, А.О. Применение компьютерного моделирования для определения коэффициента эффективности излучения нагревательных элементов / Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XIV Международной научно-методической конференции, Воронеж, 6-8 февраля 2014 г.: в 4 т. Т. 2. Воронеж: Издательский дом Воронежского государственного университета, 2014. С. 363-366.

18. Глебов, А.О. Методика определения мощности индукционных нагревательных устройств / А.О. Глебов, А.В. Стрижков / Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27: сб. трудов XXVII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 3. Секции 6, 7, 8 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Тамбов: Тамбовск. гос. техн. ун-т, 2014. С. 9-11.

19. Глебов, А.О. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа расчета температурных полей прессового оборудования, реализующая определение переменного шага по времени при учете автоматического регулирования температуры» / А.О. Глебов, С.В. Карпушкин, С.В. Абрамов. Заявка №2014619553 от 24 сентября 2014 г.