

Краткие сообщения

УДК 621.365

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Л.С. Зимин¹, А.Г. Сорокин¹, Н.И. Горбачевский²

¹Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² Нижнекамский химико-технологический институт (филиал)
Казанский национальный исследовательский технологический университет
Россия, 423578, Республика Татарстан, г. Нижнекамск, пр. Строителей, 47

Предложено применение косвенного индукционного нагрева в технологическом комплексе при производстве пластмассы. С помощью метода конечных элементов, реализованного программно, смоделирована электротепловая модель системы индукционного нагрева для производства пластмассы методом литья, и исследованы электромагнитные и тепловые поля. Предложена система индукционного нагрева с оригинальными конструктивными элементами для производства пластмассы методом литья. Выявлены зависимости глубины проникновения от частоты нагрева. Определены основные энергетические показатели и алгоритмы работы, состоящие из нескольких этапов, которые обеспечивают требуемое температурное распределение в нагреваемом полимерном материале при производстве пластмассы.

Ключевые слова: *производство пластической массы, литьевая машина, методы моделирования, энергетические параметры.*

Применение изделий из пластических масс возрастает с каждым годом. Это наблюдается в автомобилестроении и производстве электротехнической продукции. Производство большинства таких материалов является сложным технологическим процессом, который экономически целесообразен только при осуществлении его в промышленном масштабе. Высокая техническая сложность и значительные капиталовложения послужили стимулом для поиска способов повышения энергоэффективности процесса производства пластических масс.

К переработке пластических масс относится следующее. Первое – это подготовка пластических материалов к переработке: модификация их путем различных химических превращений или добавления веществ, изменяющих соответствующим образом их свойства. Второе – это переработка полимеров: разработка и применение различных процессов расплавления, формирования и других методов, изменяющих свойства пластических материалов с целью лучшего их использования. Третье – это изготовление деталей из пластмасс с учетом свойств

Лев Сергеевич Зимин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Алексей Григорьевич Сорокин (к.т.н.), доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

Николай Иванович Горбачевский (к.т.н.) зав. кафедрой «Электротехника и энергообеспечение предприятий».

материала и условий эксплуатации. Четвертое – это общие технологические операции, такие как контроль качества продукции, разработка методов испытаний, некоторые экономические вопросы.

Производство продукции из пластических масс в настоящее время осуществляется в литьевой машине. Объект для проектирования представляет собой теплообменный аппарат, который состоит цилиндра 3 и вращающегося внутри него шнека 5 (рис. 1). При использовании индуктора промышленной частоты 2 нагрев полимерного материала 4 осуществляется от цилиндра и шнека одновременно [1, 2].

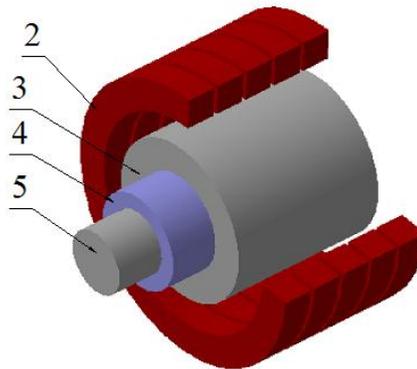


Рис. 1. Теплообменный аппарат

Электротепловой называется модель, которая учитывает взаимное влияние электромагнитного и температурного полей в процессе индукционного нагрева пластической массы.

В общем случае процесс индукционного нагрева описывается нелинейными уравнениями Максвелла для электромагнитного поля с соответствующими краевыми условиями:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = \frac{1}{\rho} E + \frac{\partial D}{\partial t}; \operatorname{rot} \dot{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}; \operatorname{div} \dot{H} = 0; \operatorname{div} \dot{E} = 0. \quad (1)$$

Здесь \dot{H} , \dot{B} , \dot{E} , \dot{D} – векторы напряженности и индукции магнитного и электрического полей.

Исходная постановка нелинейной электромагнитной задачи выражается через векторный потенциал общим уравнением Пуассона в двумерной области:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_a} \operatorname{rot} \dot{A} \right) + \gamma \frac{\partial \dot{H}}{\partial t} = \dot{J}_0; \operatorname{rot} \dot{A} = \dot{B}; \operatorname{div} \dot{A} = 0. \quad (2)$$

Здесь \dot{A} – векторный потенциал;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды;

\dot{J} – удельная электрическая проводимость.

Для решения тепловой задачи используется первый закон термодинамики, записанный в виде дифференциальных уравнений для объемных тел:

$$\gamma c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (v)^T (L) T \right] + (L)^T (q) = \ddot{q}. \quad (3)$$

Здесь \ddot{q} – скорость образования тепла в конечном объеме;

(q) – вектор теплового потока;

$(L)^T$ – векторный оператор;

(v) – вектор, характеризующий скорость переноса тепла.

Связь между вектором теплового потока и температурным градиентом устанавливается по закону Фурье:

$$(q) = -[D](L)T. \quad (4)$$

Объединение двух последних уравнений дает уравнение вида

$$\gamma c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (v)^T (L) T \right] = (L)^T ([D](L)T) = \ddot{q}. \quad (5)$$

Полученные уравнения применяются в декартовой системе координат в линейной постановке. Для полной физической определенности общая система уравнений дополняется эмпирическими зависимостями удельной теплоемкости, вязкости, коэффициентов теплопроводности, теплопередачи и других величин от температуры. Расчет теплового поля системы осуществляется методом конечных элементов, реализованным программно с помощью пакета ELCUT.

На основе анализа электротепловой модели, реализованной программно, разработан алгоритм работы, который состоит из трех этапов:

- засыпка балластного материала и разогрев в течение 1800 с;
- удаление балласта и уточненное догревание шнека до установленной температуры в течение 600 с;
- рабочий цикл – три порции сырья, время нагрева одной порции 600 с;
- подогрев системы до заданной температуры.

Обеспечить максимальный КПД можно соответствующим выбором частоты тока индуктора. Зависимость электрического КПД от частоты довольно сложна и определяется параметрами нагреваемой детали и ее состоянием. Для тел круглого сечения КПД обычно растет с повышением частоты, стремясь к предельному значению. Для полых цилиндров существует оптимальная частота, при которой КПД максимален [3, 4]. Полученные результаты представлены в таблице.

Зависимость энергетических параметров от частоты

f , Гц	50	500	1000	1500	2000	2400	3000	5000	10000
Δ , м	0,03	0,009	0,007	0,005	0,0045	0,004	0,0035	0,003	0,002
η	0,602	0,653	0,65	0,669	0,662	0,672	0,667	0,666	0,701
$\cos \varphi$	0,549	0,471	0,419	0,392	0,361	0,349	0,325	0,276	0,203

Оригинальность предложенной конструкции заключается в том, что при частоте 50 Гц будет выделение энергии в шнеке и возможность нагрева пластической массы с двух сторон. Вследствие ряда требований по уменьшению размеров индуктора и условия согласования параметров индуктора с источником питания в качестве рабочей частоты следует выбрать $f = 50$ Гц.

Решение задачи поиска конструкции и алгоритма управления показывает, что при нагреве до 600 °С наиболее пригодной и эффективной будет однослойный цилиндрический индуктор, для которого выбираем медный провод ПОЖ 6,3×2.

После окончательного расчета и проведенных уточнений принимаем индуктор с числом витков 120. Питание индуктора осуществляется от сети напряжением 220 В промышленной частотой 50 Гц. Полная мощность индуктора 22 кВт [5].

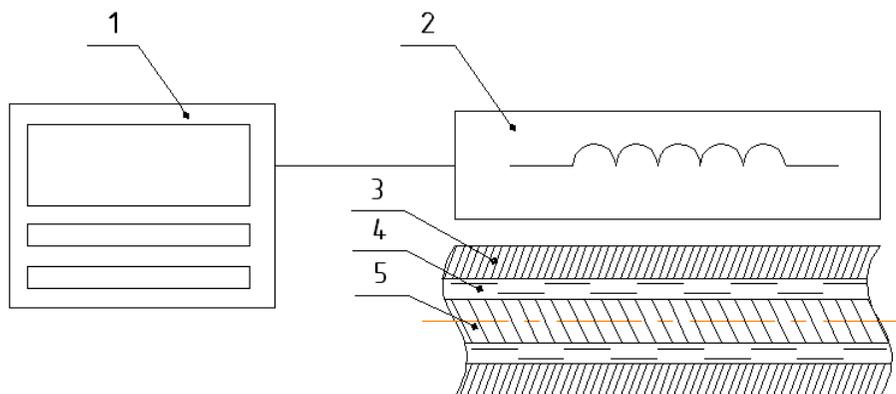


Рис. 2. Технологический комплекс индукционного нагрева:
1 – блок управления; 2 – индукционный нагреватель; 3 – цилиндр;
4 – пластиковая масса; 5 – шнек

Работу технологического комплекса осуществляет программное управление, которое обеспечивает заданную точность и минимум времени нагрева. Также на рабочем блоке размещены и другие управляющие системы, которые обеспечивают функционирование, диагностику и регистрацию всего технологического процесса.

Данный технологический комплекс индукционного нагрева при производстве пластиковых масс позволит производить контроль температуры в полимерном изделии, а также учитывать влияние того или иного возмущающего воздействия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бернхардт Э. Переработка термопластичных материалов. – М.: Госхимиздат, 1962. – 747 с.
2. Слухоцкий А.Е., Немков В.С. Установки индукционного нагрева. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
3. Шапов А.Н., Бодажков В.А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. – М.: Машиностроение, 1974. – С. 280.
4. Сорокин А.Г., Зимин Л.С. Частота тока индуктора при производстве пластмассы методом литья // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – Вып. 1(29). – С. 166–169.
5. Сорокин А.Г., Горбачевский Н.И., Мифтахова Л.Х. Энергетические параметры индуктора для технологического комплекса производства пластмассы методом литья // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Вып. 1 (Т17). – С. 254–256.

Статья поступила в редакцию 14 января 2017 г.

ELECTROTECHNICAL COMPLEX OF INDUCTION HEATING

L.S. Zimin, A.G. Sorokin, N.I. Gorbachevsky

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

Nizhnekamsk chemical institute of technology (branch) "Kazan national research technological university"
47, Stroiteley Ave., Nizhnekamsk, Republic of Tatarstan, 423578, Russian Federation

By means of the finite-element method realized programmatically the electrothermal model of system of induction heating for plastic production is simulated by method of casting and electromagnetic and thermal fields are researched. The original system of induction heating for plastic production is offered by a casting method. The main energy indicators and algorithms of work which provide required temperature distribution in the heated polymeric material are determined.

Keywords: plastic production, molding machine, modeling methods, energy parameters.

*Lev S. Zimin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Aleksey G. Sorokin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Nikolay I. Gorbachevsky (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*