

Н. И. Горбачевский, А. Г. Сорокин

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛАСТМАССЫ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ

Ключевые слова: литьевая машина, полимер, электротепловая модель, индуктор, алгоритм, проектирование.

Предложена оригинальная система индукционного нагрева для производства пластмассы методом литья. Определены основные энергетические показатели и алгоритмы работы, которые обеспечивают требуемое температурное распределение в нагреваемом полимерном материале.

Keywords: injection molding machine, a polymer Electricity model, the inductor, the algorithm design.

An original induction heating system for the production of injection molded plastic. The basic power parameters and algorithms that provide the desired temperature distribution in the heated polymer material.

На сегодняшний день изделия из полимерных материалов, полученные методом литья, очень широко применяются в промышленности, а именно, автомобильной, аэрокосмической, судоходной, электротехнической, сельского хозяйства и строительной отрасли, а также хозяйственные товары народного потребления. Высокие требования к качеству готовой продукции делают актуальной проблему синтеза надежных, эффективных и высокотехнологичных установок для нагрева полимерных материалов.

При производстве изделий из пластмассы методом литья применяют гидравлические литьевые машины. Процесс производства носит название литья под давлением. Исследуемая в работе конструкция гидравлической литьевой машины представлена на рис.1. Сырье 7 из приемного бункера 3 попадает в цилиндр пластикации 2 и равномерно распределяется по его длине посредством вращения шнека 6. Шнек приводится во вращение двигателем 1. Затем с помощью нагревателей 4 нагревается до заданной температуры, далее с помощью шнека расплавленный материал через сопло, которое программируется в зависимости от номенклатуры материала, выливается в пресс – форму штамповочного устройства 5.

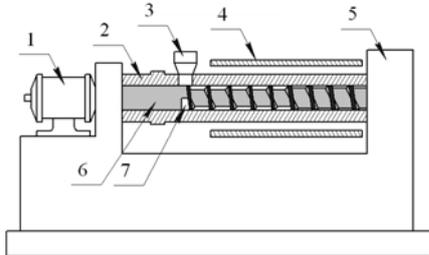


Рис. 1 - Технологическая схема гидравлической литьевой машины

В настоящее время для нагрева полимерного материала в литьевой гидравлической машине применяются трубчатые электронагреватели, а также специальные электрические нагреватели бандажного типа. Нагреватели сопротивления просты в изготовлении, не критичны к качеству электроэнергии и имеют

сравнительно невысокую стоимость. Однако, наряду с указанными достоинствами, нагреватели сопротивления имеют ряд недостатков, которые сдерживают рост производительности технологической линии и не позволяют обеспечить все более растущие требования к качеству выпускаемой продукции. Имеющиеся альтернативные способы нагрева с помощью электрической дуги, прямого нагрева сопротивлением, за счет прямого воздействия горячей водой или пара оказываются неэкономичными и малопродуктивными в силу большой тепловой инерции процесса и получение заданного диапазона температур при снижении энергопотребления установки нагрева.

Повышение эффективности технологии производства изделий из пластмассы методом литья возможно посредством применения систем индукционного нагрева.

Для составления целостной картины изменения характера распределения плотности тока и мощности в цилиндре пластикации и шнеке в процессе нагрева и возможности аналитического описания функции распределения внутренних источников тепла требуется последовательное решение электромагнитной и тепловой задач. Разделение во времени процедур расчета электромагнитного и теплового полей объясняется разной инерционностью этих процессов. Поэтому электромагнитная задача может быть сформулирована как квазистационарная, а тепловая имеет в дифференциальном уравнении временную производную первого порядка. Все это позволяет создать полностью или частично независимые процедуры расчетов электромагнитных и тепловых полей.

Модели, которые учитывают взаимное влияние электромагнитного и температурного полей в процессе нагрева называются электротепловыми. Такие модели дают исчерпывающую характеристику индукционного устройства с точки зрения потребления энергии от внешнего источника питания и выделения ее в загрузке [1].

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}_0 – удельная электрическая проводимость.

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

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

Здесь \ddot{q} – скорость образования тепла в конечном объеме; (q) – вектор теплового потока; $(L)^T$ – векторный оператор; (ν) – 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

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

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 с помощью метода конечных элементов.

Указанная постановка задачи охватывает самые общие электромагнитные явления и позволяет рассчитывать практически весь класс устройств индукционного нагрева, который может быть математически описан двумерным уравнением Пуассона. Сущность подхода, основанного на методе конечных элементов, заключается в исследовании глобальной функции процесса, в данном случае векторного потенциала, в дискретных частях анализируемой области Q, рис. 2, которая должна быть предварительно разбита на конечные

смежные подобласти, что позволяет свести задачу с бесконечным числом степеней свободы к задаче, содержащей конечное число параметров [2].

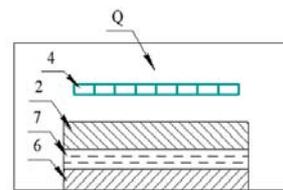


Рис. 2 - Схема индукционного нагрева при производстве пластмассы

Расчет электротепловой модели осуществляется методом конечных элементов, который реализован с помощью пакета ELCUT и FEMLAB, учитывающего специфику поставленной задачи, и предварительно группирует в области отдельные сегменты, форма которых глобально отображает конфигурацию исследуемой системы.

Самым ответственным моментом технологии производства изделий из пластмассы методом литья является нагрев полимерного материала до фиксированной температуры. Для получения качественного продукта необходимо создать температурное поле, равномерно распределенное по объему нагреваемого полимерного материала, так как перегрев ведет к потере эластичных свойств и невозможности проводить литье. Но главное при наружном индукционном нагреве цилиндра пластикации возможен при удачном выборе частоты нагрева металлического шнека. Это обеспечит нагрева полимерного материала одновременно с двух сторон.

Проведенный поиск конструкции и алгоритма управления определил, что наиболее рациональной является конструкция однослойного цилиндрического индуктора, который выполнен медным проводом ПОЖ 6,3×2. Рабочая температура до 600°C с никелированной медной жилой и двумя слоями стекловолокна с пропиткой органосиликатным составом. Число витков индуктора – 110, полная мощность индуктора 20кВт, напряжение 220В, частота 50Гц. Внешний диаметр цилиндра – 0,088м. Внутренний диаметр цилиндра – 0,046м. Толщина стенки цилиндра – 0,021м. Диаметр шнека – 0,036м. Толщина слоя полимерного материала – 0,005м [3].

Работа данной установки рис. 3. осуществляется посредством программного управления, при котором обеспечивается заданная точность и минимум времени нагрева.

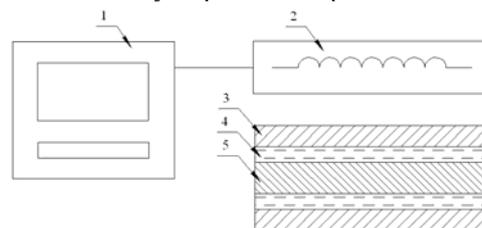


Рис. 3 - Схема индукционного нагрева: 1 – рабочая станция, 2 – индуктор, 3 – цилиндр пластикации, 4 – полимерный материал, 5 – шнек

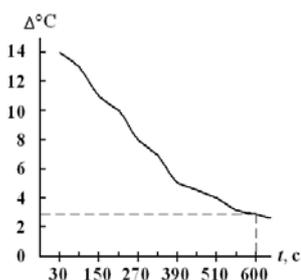


Рис. 4 - Зависимость перепада температуры от времени нагрева

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

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

При найденных параметрах индукционного нагревателя точность температурного распределения рис. 4 в полимерном материале составляет $3^\circ C$, что полностью удовлетворяет

технологии производства пластмассы методом литья.

Литература

1. Исследование электромагнитных и тепловых полей в технологической установке для производства пластмассы. [Текст]//Л.С. Зимин// Вестн. Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Техн. Науки. – 2007. Вып. №1(19) – с. 131-135.
2. Сорокин А.Г. Система индукционного нагрева для производства пластмассы [Текст]//Л.С. Зимин// Вестн. Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Техн. Науки. – 2012. Вып. №1(33) – с. 223-227.
3. Сорокин А.Г. Идентификация математической модели системы индукционного нагрева при производстве пластмассы методом литья [Текст]//Л.С. Зимин// Вестн. Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Техн. Науки. – 2012. Вып. №4(36) – с. 163-168.
4. Тумаева Е.В. Подobie оптимальных зависимостей токов в синхронном двигателе с электромагнитным возбуждением на базе теории обобщенной машины. – Вестник Казанского технол. ун-та. - №2, Т.16, с. 158-159.
5. Амирова С.С. Абдурагимов Р.А., Исаев А.А. Совершенствование управления энергосбережением цеха 2104 завода «Этилен». - Вестник Казанского технол. ун-та. - №2, Т.16, с. 180-181

© **Н. И. Горбачевский** – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой электротехники и энергообеспечения предприятий НХТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», aer-nk@mail.ru; **А. Г. Сорокин** - кандидат технических наук, доцент кафедры «Математические и естественнонаучные дисциплины» Сызранского филиала ФГБОУ ВПО «Самарский государственный экономический университет», preprodkse@yandex.ru.