

## РАСЧЕТ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ТРУБ

Индукционный нагрев металлов, т.е. нагрев проводящих тел вихревыми токами, является одним из самых эффективных применений электрической энергии в технологических процессах. Расширенное применение непрерывных технологических процессов в конце XX века привело к использованию индукционных нагревателей, как идеально вписывающихся в такие автоматизированные линии, как непрерывная разливка металла с последующей прокаткой, непрерывная термообработка и покрытие ленты защитными материалами, термообработка труб, штамповка сплавов в твердожидком состоянии и т.д.

Применение индукционного нагрева в металлургической промышленности всегда приводит к повышению качества продукции, гибкости и автоматизации непрерывных линий, появляется возможность резко увеличить производительность при существенном сокращении производственных площадей, облегчается и улучшается обслуживание печей (по сравнению с газовыми). Отсутствие продуктов сгорания и других загрязнений улучшает экологическую обстановку.

Технология нагрева требует правильного выбора индуктора и всех параметров процесса. Поэтому необходимо обеспечить наиболее качественный и выгодный режим работы установки для всех типоразмеров заготовок и всех нагреваемых материалов.

Целью работы является исследование технологического процесса индукционного нагрева стальных труб с помощью математического моделирования тепловых и электромагнитных процессов и разработка автоматизированной индукционной установки для подогрева стальных труб перед калибровочным станом.

Разрабатываемая индукционная установка должна войти в состав линии по производству труб на Ижорском заводе. Выбор индукционной установки обусловлен необходимостью подогрева и выравнивания температуры по длине трубы после нагрева в газопламенной печи. Особенности установки являются ее полная автоматизация и наличие системы автоматического регулирования температуры для обеспечения перепада температур по длине трубы не более 50°C.

Математическая модель процессов, протекающих в нагреваемой заготовке, составляется на основе закона сохранения энергии и уравнений электромагнитного поля. Совокупность этих уравнений с начальными и граничными условиями и их последующее решение численным их решением позволяют получить как распределения параметров, характеризующих сам индуктор, так и параметры, характеризующие процессы внутри нагреваемого проводящего цилиндра. Модель имеет следующие допущения: индуктор рассматривается как несколько круговых витков, плоскость которых перпендикулярна оси индуктора; по виткам индуктора протекает синусоидальный ток; в проводящем цилиндре и в индукторе ток переноса равен нулю; электрическая и магнитная проницаемости воздуха и нагретого выше точки Кюри металла такие же, как и у вакуума; токи во всех витках индуктора одинаковые, имеют нулевую фазу. Для решения тепловой задачи используются граничные условия двух типов: граничные условия 1 рода (условия Дирихле: на границе задаются значения искомой величины) на входе в индуктор и граничные условия 2 рода (условия Неймана: задаётся производная от искомой величины по направлению, перпендикулярному к границе) на остальных границах расчетной области (сделаем допущение, что ввиду отсутствия вынужденной конвекции все энергетические процессы активно происходят только внутри металлической заготовки). Так как индуктор и заготовка имеют цилиндрическую форму, то для записи уравнений удобно использовать цилиндрическую систему координат. Предполагается, что изменение величин при изменении угла  $\varphi$  мало, и им можно пренебречь. Поэтому рассматривается

двухмерный случай, в котором предполагается двухмерная ( $r, z$ ) зависимость искомых величин.

Система нелинейных дифференциальных уравнений решается методом контрольного объема [1]. Исходными данными для расчета являются геометрические параметры индуктора и заготовки, ток индуктора, частота тока индуктора, свойства материала заготовки, скорость движения заготовки через нагреватель.

Результатами расчета являются распределения различных величин в расчетной области в процессе нагрева: температуры, электрического и магнитного полей, плотности электрического тока.

Расчет был произведен для конкретных исходных данных, определяемых требованиями к установке: начальная температура заготовки  $800^{\circ}\text{C}$ , требуемая температура нагрева  $950^{\circ}\text{C}$ , толщина стенки трубы 10 мм, материал – сталь 20. Параметры установки: мощность 1600 кВт, частота 2,4 кГц, ток индуктора 6000 А, скорость движения заготовки 0.25 м/с. Из полученных графиков распределения температуры заготовки видно, что по мере прохождения заготовки через индукторы, ее температура повышается, в промежутке между индукторами нагрев приостанавливается, происходит выравнивание температуры по сечению трубы. На выходе из второго индуктора температура заготовки достигает значения  $T=950^{\circ}\text{C}$ , что соответствует поставленной при проектировании задаче. Осевая составляющая напряженности магнитного поля имеет максимальное значение в середине индуктора, равное  $2 \cdot 10^5$  А/м и уменьшается к его торцам, в радиальном направлении она резко спадает внутри металлической заготовки. Радиальная составляющая напряженности магнитного поля имеет место только по краям индуктора (торцевой эффект). Максимальное значение – также  $2 \cdot 10^5$  А/м. Как и ожидалось, ток протекает только внутри металлической заготовки. Максимум плотности электрического тока лежит вблизи поверхности заготовки, что иллюстрирует поверхностный эффект. Максимальное значение плотности тока –  $2.75 \cdot 10^7$  А/м<sup>2</sup>. На рис. 1 представлено распределение температуры по продольному сечению заготовки,  $^{\circ}\text{C}$ , при прохождении сквозь два индуктора.

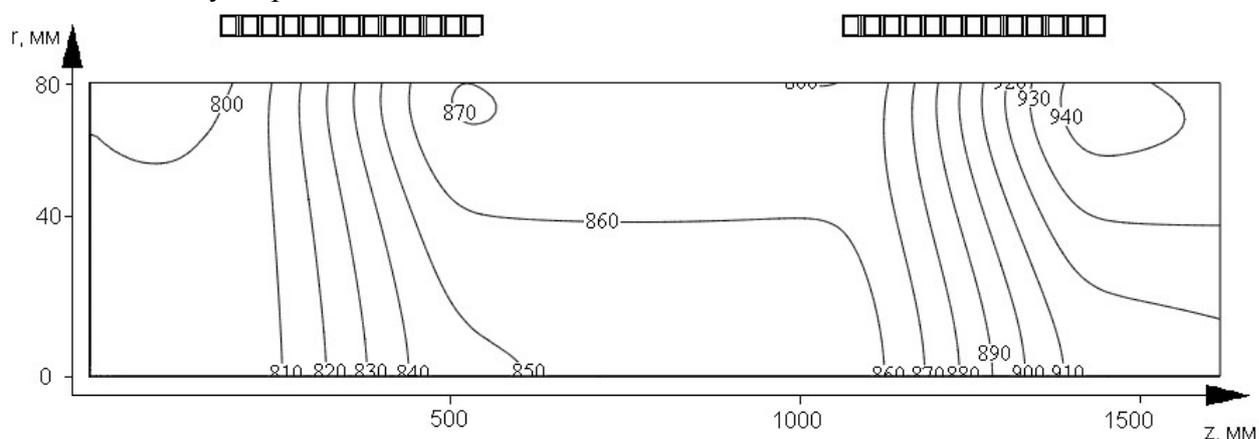


Рис. 1

**Выводы.** Был произведен расчет установки для подогрева стальных труб с высокой точностью поддержания необходимой температуры по толщине заготовки. Разработано программное обеспечение, позволяющее производить расчет установок индукционного нагрева проводящих материалов. Примененный метод расчета позволяет использовать программное обеспечение для проектирования широкого спектра установок, в том числе для нагрева заготовок любой формы и заготовок из различных материалов, а также для расчета нагрева при питании установки от источников различной частоты, что является преимуществом по сравнению с программным обеспечением, основанным на методе интегральных уравнений. Для проверки точности расчетов предлагается провести экспериментальную проверку.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Дресвин С.В., Иванов Д.В. Основы математического моделирования плазмотронов. Ч.1: Уравнение баланса энергии: Учеб. пособие. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2006. 286 с.