

## ВОПРОСЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ТЕПЛОЕМКИХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ В ЭЛЕКТРОПЕЧАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В электропечах сопротивления (ЭПС) электроэнергия преобразуется в тепловую для использования в технологических процессах термообработки промышленных металлоизделий, которые называют садками. Массивные садки, обладающие большой теплоемкостью, принято называть «толстыми». Цикл термообработки толстой садки включает нагрев ее до заданной технологической температуры  $\theta_3^0$ , выдержку при  $\theta_3^0$  и охлаждение, которое может проводиться как в ЭПС, так и вне ее.

Проанализируем нагрев из холодного состояния ЭПС с толстой садкой под термообработку с заданной  $\theta_3^0$ . ЭПС вместе с садкой образует сложную систему теплотехнических звеньев с разными постоянными времени нагрева. Наименьшего времени нагрева требуют сами резисторы нагревателей и близкие к ним элементы внутри ЭПС, которые подвергаются прямому воздействию тепла нагревателей. Часть ЭПС, которая заключена между внутренними стенками с термостойкой футеровкой и поверхностью толстой садки, назовем рабочим пространством печи (РПП). В РПП находятся нагреватели, конструкции термопар и воздушная или газовая среда. В нашем случае РПП допустимо рассматривать как единое теплотехническое звено, характеризующееся общей постоянной времени нагрева  $T_{РПП}$ . Нагреваемую толстую садку можно считать теплотехническим звеном с постоянной времени нагрева  $T_C \gg T_{РПП}$ .

Рассмотрим традиционный нагрев системы ЭПС-садка до заданной технологической температуры  $\theta_3^0$  с постоянным расходом мощности  $P_I(t) = P_H = const$ . Из-за разницы значений  $T_C$  и  $T_{РПП}$  нагрев РПП идет быстрее, чем нагрев садки. Поэтому, когда в РПП температура по истечении некоторого времени  $t = t_H$  достигает  $\theta^0(t_H) = \theta_3^0$ , то примерно такой же будет и температура поверхностного слоя садки, а температура в центре садки окажется гораздо ниже. Тепло в тело садки поступает из РПП и  $\theta^0(t_H)$  садки определяется значением  $\theta_{РПП}^0$  на интервале  $t = t_H$ , а при изменяющейся температуре – ее средним значением на интервале нагрева. В нашем случае график  $\theta_{РПП}^0(t)$  близок к прямой и  $\theta_{cp}^0 = 0,5\theta_3^0$ . При этом температура центра садки в конце интервала нагрева определяется зависимостью

$$\theta_{1Ц}^0(t_H) = 0,5\theta_3^0 \left( 1 - e^{-\frac{t_H}{T_C}} \right) \quad (1)$$

Температура садки не должна превышать технологического значения  $\theta_3^0$ , поэтому, начиная с  $t = t_H$ , ЭПС переводится в стадию выдержки с автоматическим поддержанием в РПП температуры  $\theta_3^0$ . При этом сложившаяся разница  $\Delta\theta_{1Ц}^0(t) = \theta_3^0 - \theta_{1Ц}^0(t_H)$  устраняется за счет теплопередачи. На этой стадии на садку действует не разность  $\theta_{1Ц}^0(t_H)$ , а вся температура  $\theta_3^0$ . Поэтому процесс выравнивания протекает в соответствии с зависимостью

$$\theta_{1Ц}^0(t) = \theta_3^0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) \quad (2)$$

Напомним, что мы проанализировали нагрев в режиме 1 с постоянным расходом мощности  $P_I(t) = P_H = const$ .

Исследования показали [1, 2, 3], что, реализовав график расхода мощности в соответствии с зависимостью

$$P_{Ж}(t) = 5P_H \cdot e^{-\frac{5t}{T_H}}, \quad (3)$$

мы получим желаемую характеристику  $\theta_{жРПП}^0(t) = \theta_3^0 \left( 1 - e^{-\frac{5t}{T_H}} \right)$ , которая на интервале  $t = t_H$  дает значение

ние  $\theta_{жCP}^0(t) = 0,8\theta_3^0$ . Используя предыдущую методику, легко показать, что нагрев центра садки на этом интервале будет протекать в соответствии с зависимостью

$$\theta_{жЦ}^0(t_H) = 0,8\theta_3^0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right), \quad (4)$$

а сама разница  $\Delta\theta_{жЦ}^0(t_H)$  будет гораздо меньше, чем  $\Delta\theta_{Ц}^0(t_H)$ .

Напомним, что на предварительной стадии нагрева  $t_H$ , которая заканчивается достижением в РПП и на поверхности садки заданной температуры  $\theta_3^0$ , затраты электроэнергии при обоих способах регулирования мощности при нагреве равны

$$\int_0^{t_H} P_H dt = \int_0^{t_H} 5P_H \cdot e^{-\frac{5t}{T_C}} dt = P_H \cdot t_H$$

При этом энергозатраты  $\mathcal{E}_{ж}$  и  $\mathcal{E}_{ж}$  на «дотягивание»  $\theta_{Ц}^0$  до  $\theta_3^0$  во время выдержки, напротив, существенно зависят от способа предварительного нагрева.

После традиционного нагрева при  $P(t) = P_H = const$  разница температур между поверхностью и центром садки составят с учетом (1)

$$\Delta\theta_1^0(t_H) = \theta_3^0 - \theta_{Ц}^0(t_H) = \theta_3^0 - 0,5\theta_3^0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right) = \theta_3^0 \cdot \left[ 1 - 0,5 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right) \right] \quad (5)$$

Аналогично, после нагрева при  $P(t) = 5P_H e^{-\frac{5t}{T_C}}$  разность температур будет

$$\Delta\theta_{ж}^0(t_H) = \theta_3^0 - \theta_{жЦ}^0(t_H) = \theta_3^0 - 0,8\theta_3^0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right) = \theta_3^0 \cdot \left[ 1 - 0,8 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right) \right] \quad (6)$$

Полагая, что реальные энергозатраты в одной и той же системе ЭПС-садка, расходуемые на дотягивание во время выдержки  $\theta_{Ц}^0$  до  $\theta_3^0$ , пропорциональны разности  $\theta_3^0 - \theta_{Ц}^0(t)$ , заменим отношение энергозатрат отношением соответствующих разностей температур (5) и (6)

$$\frac{\mathcal{E}_{ж}}{\mathcal{E}_{ж}} = \left[ \theta_3^0 \cdot \left[ 1 - 0,8 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right) \right] \right] / \left[ \theta_3^0 \cdot \left[ 1 - 0,5 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right) \right] \right],$$

откуда получим

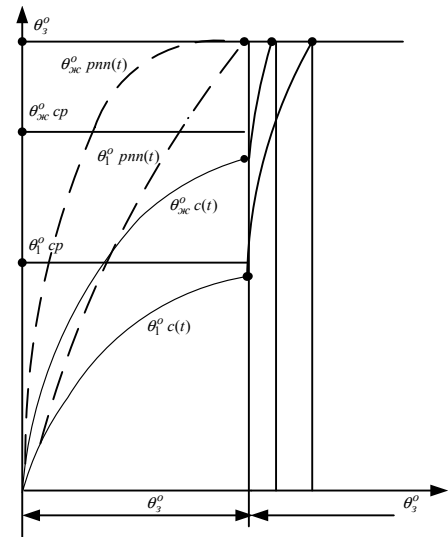
$$\mathcal{E}_{ж} = \mathcal{E}_{ж} \left[ 1 - 0,8 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right) \right] / \left[ 1 - 0,5 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right) \right] \quad (7)$$

Соотношение энергозатрат (7) зависит от величины постоянного нагрева толстой садки и рабочего пространства электропечи сопротивления. При варьировании отношения постоянных в пределах  $T_C = (1 \div 4)T_{РПП}$  экономия энергозатрат при использовании предлагаемого метода нагрева составляет от 60 до 30% по сравнению с традиционным нагревом. Расчетные траектории электронагрева рассмотренными способами при  $T_C \approx 2T_{РПП}$  приведены на графиках.

В заключении следует сказать о режимах термообработки, в которых темп нагрева требуется ограничивать предельным значением  $\Delta\theta_{np}^0 / час$ . В таком случае конечное значение  $\theta_3^0$  нужно разделить на «n» интервалов ( $n = \theta_3^0 / \Delta\theta_{np}^0$ ) длительностью  $t_H = 1$  час. Известно, что если каждый интервал нагрева проводить по оптимальной методике, то результирующая траектория нагрева будет обладать той же эффективностью, что и каждый интервал.

Литература:

1. Воинов В.В., Воинов В.П. Формирование высокоэффективных переходных процессов в электроприводе и электротермии. /Вісник НТУ «ХП», - 2008, - с.495
2. Воинов В.В., Воинов В.П. «Спосіб формування бажаних перехідних режимів» /Патент України №29614, - виданий 25.01.2008, - бюл. №2
3. Воинов В.В., Воинов В.П. Использование желаемых экспоненциальных траекторий для повышения эффективности переходных процессов. /Вісник НТУ «ХП», - 2008, - с.11-15



Графики электронагрева в ЭПС толстой садки с  $T_C \approx 2T_{РПП}$