

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 θ_3^0 , выдержку при θ_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 θ_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 $T_C > T_{РПП}$.

Рассмотрим традиционный нагрев системы ЭПС-садка до заданной технологической температуры θ_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 θ_3^0 , поэтому, начиная с $t = t_H$, ЭПС переводится в стадию выдержки с автоматическим поддержанием в РПП температуры θ_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 θ_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

$\theta_{жCP}^0(t) = 0,8\theta_3^0$. 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 θ_3^0 , затраты электроэнергии при обоих способах регулирования мощности при нагреве равны

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

При этом энергозатраты $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_ж$ на «дотягивание» $\theta_{Ц}^0$ до θ_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 составит 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 $P(t)=5P_H e^{\frac{-5t}{T_H}}$ 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 θ_3^0 , пропорциональны разности $\theta_3^0 - \theta_{Ц}^0(t)$, заменим отношение энергозатрат отношением соответствующих разностей температур (5) и (6)

$$\frac{\mathcal{E}_{ж}}{\mathcal{E}_1} = \left[\theta_3^0 \cdot \left[1 - 0,8 \left(1 - e^{\frac{-t}{T_C}}\right)\right] \right] / \left[\theta_3^0 \cdot \left[1 - 0,5 \left(1 - e^{\frac{-t}{T_C}}\right)\right] \right],$$

откуда получим

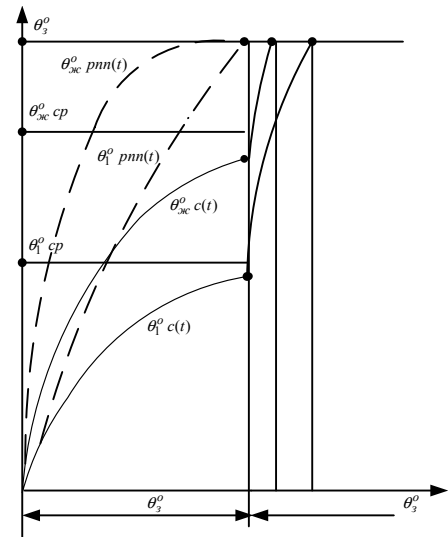
$$\mathcal{E}_{ж} = \mathcal{E}_1 \left[1 - 0,8 \left(1 - e^{\frac{-t}{T_C}}\right) \right] / \left[1 - 0,5 \left(1 - e^{\frac{-t}{T_C}}\right) \right] \quad (7)$$

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 θ_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 $T_c \approx 2T_{рпп}$