

УДК 621.36

## АСУ ДЛЯ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Заgrabчук С. Ф.

научный руководитель д-р техн. наук Тимофеев В. Н.

*Сибирский федеральный университет*

Камерная печь-миксер предназначена для приготовления расплавов заданной температуры и химического состава. Для каждого типа сплава predeterminedлена своя температура приготовления, которая должна строго выдерживаться по технологическому регламенту. Проектируемая камерная печь для термообработки металлов, представленная на рисунке 1, состоит из:

- камеры нагрева для подготовки сплавов (1);
- блока карбидкремниевых нагревателей (2);
- тиристорного регулятора, обеспечивающего электропитание нагревателей;
- гидравлического привода поворота печи (3);
- литейного устройства (4).

Для обеспечения автоматического регулирования предусматривается использование датчиков разных типов, перечень и назначение которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Перечень и назначение датчиков АСУ

№	Датчики	Назначение
5	Термопара ТХАв-2388-02-200-2-1-1-Т45	Контроль температуры нагревателей
6	Термопара ТХАв-2388-04-800/500-2-1-1	Контроль температуры металла
7	Датчики тока ДТТ-03Т-50А	Измерение токов в плечах нагревателей

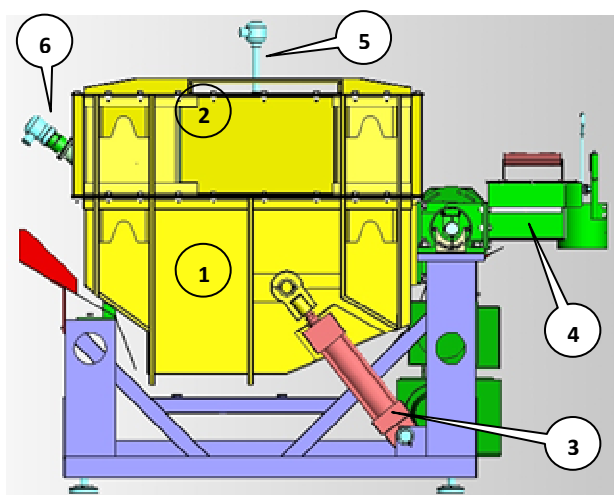


Рисунок 1 – Проектируемая печь для термообработки металлов

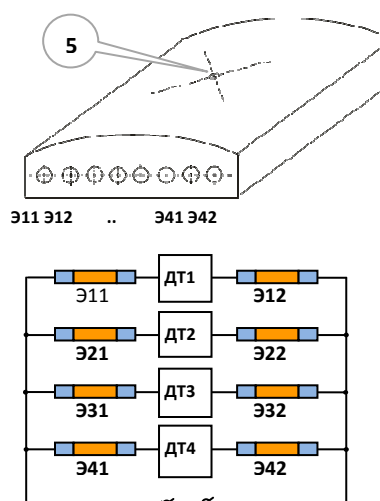


Рисунок 2 – Схема размещения термопары и нагревателей в своде печи, и электрическая схема их соединения

Блок карбидкремниевых нагревателей (КЭН) содержит восемь элементов Э11..Э42 (Э<sub>ij</sub>, где *i* – номер плеча, *j* – номер КЭН в плече). Схема размещения нагревателей приведена на рисунке 2: все элементы монтируются в своде печи параллельно друг другу.

Электрическая схема соединения нагревателей включает четыре нагревательных плеча, соединённых параллельно. Каждое плечо включает по два КЭН, соединённых последовательно. Ток в каждом из плечей 1..4 контролируется датчиками тока ДТ1..ДТ4 на основе эффекте Холла; измерение происходит бесконтактным способом.

В отличие от металлических нагревательных элементов, карбидкремниевые нагреватели могут применяться при высоких температурах (до 1300..1450°С на поверхности нагревателей). Внешний вид таких нагревателей приведён на рисунке 3. Нагреватели в процессе работы не подвергаются коррозии, мало подвержены деформации, достаточно стойки к окислению в атмосфере, легко устанавливаются в печь, имеют достаточно долгий срок эксплуатации. Поэтому карбидкремниевые нагреватели широко используется в различных высокотемпературных электрических печах.



Рисунок 3 – Карбидкремниевые нагревательные элементы (КЭН)

Печи, снабженные нагревателями из карбида кремния, во многих случаях превосходят печи с металлическими нагревателями по технико-экономическим показателям, например, по возможности проведения процессов в окислительной атмосфере, а также по обеспечению большей мощности при одних и тех же размерах рабочего пространства. Применение карбидкремниевых нагревателей, по сравнению с нагревателями из металлических материалов, позволяет проводить замену неработоспособных элементов без длительной остановки печи. Эту возможность можно отнести к отличительным свойствам КЭН, наряду с более высокой температурой применения и более высоким удельным сопротивлением.

Основные недостатки КЭН – необходимость более аккуратного использования, связанного с невысокой механической прочностью, а так же старение в процессе эксплуатации. Старение проявляется в увеличении сопротивления нагревателей из-за постепенного окисления и характеризуется нестабильной скоростью изменения. Вследствие этого, силовое оборудование должно иметь возможность постепенного повышения напряжения питания при регулировании [1].

Использование циклического режима (нагрев, выдержка, охлаждение и следующее повторение цикла) приводит к снижению срока службы нагревателей в 2..3 раза по сравнению с непрерывным режимом. Наиболее неблагоприятный режим эксплуатации – циклический с полным охлаждением до температуры помещения. При повторном разогреве сопротивление нагревателей существенно возрастает, поэтому при непрерывном режиме работы не рекомендуется охлаждать печь ниже порогового значения, определяемого, по разным источникам, величиной от 800°С [1] и вплоть до 950°С.

При выборе способа регулирования температуры нагревателей рекомендуется использовать непрерывное регулирование, а не позиционное (то есть включение и отключение нагрева на заданных температурных границах). При одинаковой температуре в электропечи непрерывное регулирование, по сравнению с позиционным, приводит к увеличению срока службы нагревателей и поэтому более предпочтительно.

В отличие от установившегося режима, управление разогревом нагревателей включает дополнительные требования: рекомендуется медленное и постепенное увеличение напряжения, подаваемого на «холодные» нагреватели, а скорость подъёма температуры должна быть ограничена величиной 350°С/час [2].

Суммируя эксплуатационные особенности применения карбидкремниевых нагревателей, запишем основные требования к автоматическому терморегулированию:

- 1) предусмотрен запас регулирования по возможности постепенного повышения напряжения, подаваемого на КЭНы, в течении срока их эксплуатации;
- 2) в установившемся режиме используется непрерывное ПИД-регулирование;
- 3) напряжение, подаваемое на КЭНы, ограничено заданным пороговым значением;
- 4) медленный и постепенный подъем напряжения при разогреве;
- 5) скорость подъема температуры при разогреве должна быть ограничена;
- 6) скорость снижения температуры при охлаждении должна быть ограничена;
- 7) необходима индикация недопустимых установившихся температурных режимов.

Система автоматического терморегулирования полагается полностью автономной, то есть несвязанной с другими задачами АСУ, и состоящей из промышленных измерителей-регуляторов. Это позволит в краткие сроки провести опытно-конструкторские работы, связанные с нагревательной частью проектируемой камерной печи (обжиг футеровки, исследование тепловых режимов и т.п.). При практическом выборе промышленных блоков автоматики, предназначенных для терморегулирования, была рассмотрена продукция отечественной фирмы ОВЕН [3]. Предлагаемые измерители-регуляторы имеют возможность двухпозиционного и ПИД-регулирования, работают в сети по протоколу RS-485, и могут решать достаточно широкий круг задач.

Вначале было рассмотрено предложенное решение, основанное на использовании двух отдельных блоков: позиционного регулятора и ПИД-регулятора. Условие п.2 вышеизложенных требований заставило отказаться от позиционного регулирования. При изучении возможностей регуляторов выяснилось, что в рассмотренной серии приборов доступен вариант только классического одноконтурного ПИД-регулятора [4]. Этот вариант является неподходящим для нашего случая, так как для него затруднительно выполнить условия п.п. 4, 5 и 6 [5]. Опытная процедура определения коэффициентов ПИД-регулирования с большой вероятностью будет связана с нарушениями этих условий, что может привести к быстрому старению или даже выходу нагревателей из строя.

Кроме того, карбид кремния в чистом виде является полупроводником, вследствие чего изменение его сопротивления от температуры существенно нелинейно. Сопротивление уменьшается при нагреве до 1000°С примерно в 2..5 раз [1, 2], что ещё более затрудняет определение коэффициентов ПИД-регулирования.

Затем, при поиске подходящего решения, была рассмотрена возможность применения программных регуляторов [3]. Программный регулятор (ПР) представляет собой усовершенствованный ПИД-регулятор с расширенными возможностями управления.

Главная особенность ПР – это возможность использования нескольких этапов (нескольких «программ»-алгоритмов) при выполнении задач регулирования. Каждый этап описывается отдельным набором параметров регулирования, а также условиями перехода к следующему этапу. Предусматривается режим поддержания скорости изменения регулируемого параметра, а также скорости изменения мощности. Наконец, программа регулирования может быть или остановлена, или «зациклена» по нескольким этапам для осуществления непрерывной работы. Выход из цикла или повторной запуск осуществляется нажатием кнопок на передней панели регулятора.

В результате была построена схема терморегулирования (рисунок 4), основанная на использовании программного регулятора и измерителя. Термопара нагревателей подсоединена прямо ко входу 1 ПР, а термопара нагревателей подсоединена ко входу 2 ПР через измеритель. Таким образом, на входы ПР поступают данные об обеих измеряемых температурах, и вычислитель ПР, на разных этапах работы, имеет возможность вести регулирование по какой-либо из этих температур. Индикация температуры осуществляется на каждом блоке в соответствии с подключенной термопарой.



Применение программного регулятора позволяет разбить процесс регулирования на несколько последовательных по времени этапов; на этапах I и II регулирование опирается только на термопару нагревателей:

- I** – медленный и постепенный подъём напряжения при разогреве (для выполнения пункта 4 требований к регулированию);
- II** – набор температуры КЭНов с заданной скоростью (п.5);
- III** – на этапах III и IV регулирование опирается на термопару металла; температура КЭНов регулируется из условия поддержания заданной температуры металла;
- IV** – работа ПИД-регулятора в режиме поддержания температуры металла (п.2);
- V** – на этом этапе регулирование опять опирается на термопару нагревателей; проводится проверка недопустимых установившихся температурных режимов (п.7);
- VI** – переход на этап IV – «зацикливание» регулирования.

Приборы, входящие в состав рассмотренной блок-схемы рисунка 4 позволяют удовлетворить также и ограничения на регулирование по п.п. 1, 3 и 7. Пункт 6 ограничивает скорость охлаждения. Если опытное определение естественной скорости остывания печи покажет, что она достаточно мала, возможно, автоматизированного регулирования при остывании не потребуется. Допустимо реализовать до 12-ти разных программ, что позволяет выполнять не только алгоритм, описанный выше («алгоритм разогрева»), но и, при необходимости, иные алгоритмы управления. Например, «алгоритм остывания» или «алгоритм замены термоэлемента» и т.д.

**Вывод:** Таким образом, представленная блок-схема терморегулирования позволяет обеспечить работоспособность нагревателей и требуемую технологическую температуру расплава.

## Литература

1. Материалы для электротермических установок: Справочное пособие / Н. В. Большакова, К. С. Борисанова, В. И. Бурцев и др.; Под ред. М. Б. Гутмана. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.: илл.
2. Карбидкремниевые нагреватели (SiC): техн. информация // Компания «Керамикс» [сайт]. – Московская область, М.Кишнево. 2014. – Режим доступа: <http://keramomix.net/nagrevateli.html>
3. Каталог выпускаемой продукции: техн. информация // ЗАО «ОВЕН» [сайт]. – Москва. 2014. – Режим доступа: <http://www.owen.ru/catalog/17760453>
4. Денисенко, В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66–74; – 2007. – № 1. – С. 78–88.
5. Денисенко, В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 86–97; – 2008. – № 1. – С. 86–99.