

УДК 669.04

**Д.И. Спитченко¹, А.М. Вохмяков¹, Е.В. Киселев¹,
М.Д. Казяев¹, Д.М. Казяев²**

¹Уральский Федеральный Университет

²ООО «НПК «УралТермоКомплекс»

ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕВООРУЖЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КРУПНЫХ ПОКОВОК

Аннотация. На примере Уралмашзавода рассмотрено техническое перевооружение камерной вертикальной печи с применением современных технологий печестроения и материалов, произведен расчет тепловых балансов и основных показателей работы печи до и после технического перевооружения. Подтверждено значительное улучшение показателей работы печи после технического перевооружения.

Ключевые слова: термообработка, вертикальная термическая печь, тепловой баланс, волокнистые огнеупоры, рекуперативная горелка.

TECHNICAL RE-VERTICAL CHAMBER FURNACES FOR HEAT TREATMENT OF LARGE FORGINGS

Abstract. Uralmashzavod is used as basis to assess technical re-equipment of chamber vertical heat-treatment furnace with applying modern technologies of furnace-building and modern materials. The calculation of thermal balances and furnace primary performance characteristics was made before and after re-equipment. Significant improvement of furnace performance characteristics after technical re-equipment was confirmed.

Keywords: heat-treatment, vertical heat-treatment furnace, thermal balance, fibrous refractory material, recuperative burner.

На заводах тяжелого машиностроения эксплуатируют вертикальные печи для термической обработки крупных длинномерных поковок.

На ОАО «Уралмашзавод» подобные печи применяются для нагрева роторов турбин и прокатных валков с целью их термической обработки. Построенные в начале прошлого века, эти печи к настоящему моменту морально и физически устарели. Повышенные требования к качеству термической обработки заставляют заниматься модернизацией этих тепловых агрегатов.

В данной статье изложены методы и оборудование, использованные при техническом перевооружении одной из вертикальных печей кузнечно-прессового цеха Уралмашзавода.

Конструкция и тепловая работа печи до технического перевооружения

Камерная вертикальная печь № 22 была построена по кирпичной технологии, с двухслойной футеровкой. Огнеупорный слой был выполнен из шамота класса А, теплоизоляционный слой – из шамота легковеса. Толщина футеровки составляла 460 мм, что при работе печи в периодическом режиме приводит к значительной аккумуляции тепла кладкой. Свод печи был выполнен в виде двух раздвижных полукрышек. Загрузка печи осуществлялась сверху. Высота рабочего пространства печи 12 м, внутренний диаметр 3 м. Изделия в печи подвешивают на специальной траверсе, опирающейся на балки. Устаревшая конструкция механизмов перемещения крышки приводила к неплотностям и, как следствие, к большим

теплопотерям, что негативно сказывалось на расходе топлива. Дымоотведение из рабочего пространства осуществлялось через дымоотводящий канал, расположенный в поду печи, дымовой боров и дымовую трубу, общую для нескольких печей. Печь была оснащена 13 горелками конструкции Уральского завода тяжелого машиностроения. Подогрев воздуха, подающегося на горение, отсутствовал. Ведение теплового режима печи осуществлялось вручную обслуживающим персоналом.

Применение кирпичной футеровки, горелок устаревшей конструкции, ручного управления печью приводило к низкому КПД печи, значительным энергозатратам, низкому качеству нагрева.

Для подтверждения описанного выше был рассчитан тепловой баланс для режима нормализации при нагреве ротора максимальной массой 60 т [1]. Баланс составлен для интервала температур 700 – 960 °С, при котором устанавливается максимальная скорость нагрева садки, требующая максимальных затрат топлива.

В ходе расчета использовались следующие исходные данные:

- максимальная масса изделия = 60 т;
- максимальная скорость подъема температуры = 80 °С/ч;
- время нагрева $\tau = 3,25$ ч;
- теплота сгорания природного газа $Q_p^H = 34\,000$ кДж/м³;
- коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,2$;
- начальная температура металла $t_{м.нач} = 700$ °С;
- теплоемкость металла при $t_{м.нач}$, $c_{м.нач} = 0,645$ кДж/(м³·К);
- конечная температура металла $t_{м.кон} = 960$ °С;

– теплоемкость металла при $t_{\text{м.кон}}, c_{\text{м.кон}} = 0,689$ кДж/(м³·К);

– масса специальной оснастки (траверсы) $m = 20\,000$ кг;

– средняя температура отходящих газов $\bar{t}_{\text{ух.г}} = 880$ °С;

– энтальпия отходящих газов $i_{\text{ух.г}} = 1334,6$ кДж/м³.

По приведенным исходным данным было составлено уравнение теплового баланса

$$Q_x + Q_b = \Delta Q_1 + Q_2 + Q_{5т} + Q_{5пр} + Q_6, \quad (1)$$

где Q_x – химическая теплота топлива; Q_b – физическая теплота подогретого воздуха; ΔQ_1 – полезная затрата теплоты; Q_2 – потери теплоты с уходящими газами; $Q_{5т}$ – потери теплоты теплопроводностью через футеровку; $Q_{5пр}$ – потери теплоты с приспособлениями; Q_6 – аккумуляция теплоты кладкой.

В ходе расчетов была получена структура теплового баланса (табл. 1).

Ниже приведены основные показатели работы печи [2].

Общая тепловая мощность печи за период подъема температуры от 700 до 960 °С:

$$Q_{\text{общ}} = BQ_p^{\text{н}} = 6480,4 \text{ кВт}, \quad (2)$$

где B – расход топлива, м³/ч; $Q_p^{\text{н}}$ – теплота сгорания природного газа, кДж/м³.

Удельный расход условного топлива за период подъема температуры от 700 до 960 °С:

$$b = \frac{BQ_p^{\text{н}}}{29,31P_{\text{м}}} = \frac{6480,4}{29,31 \cdot 5,13} = 43,1 \frac{\text{кг у.т}}{\text{т}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{м}}$ – производительность печи, кг/с.

Коэффициент полезного действия печи:

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{\Delta Q_1}{Q_{\text{прих}}} \cdot 100 = \frac{1079,04}{6480,4} \cdot 100 = 16,65 \%, \quad (4)$$

где $Q_{\text{прих}}$ – суммарный приход теплоты.

Кирпичная футеровка печи приводит к большой аккумуляции тепла кладкой и высоким потерям теплоты теплопроводностью (32,68 %). Использование кирпичной

футеровки, а так же отсутствие узла утилизации тепла отходящих газов приводит к низкому КПД печи – 16,65 %.

Для увеличения КПД печи, уменьшения расхода топлива, увеличения производительности печи, повышения качества продукции, а также для улучшения условий труда и экологической обстановки целесообразно проведение полного технического перевооружения печи.

Направление технического перевооружения вертикальной термической печи

Предложен комплекс мер, обеспечивающих значительное повышение качества нагрева металла, резкое снижение энергозатрат и внедрение комплексной автоматизации теплового режима:

– замена кирпичной футеровки на керамоволокнистую;

– применение современных рекуперативных горелок;

– внедрение АСУ ТП.

Для этих условий и того же режима нормализации рассчитан тепловой баланс и основные показатели работы печи.

Исходные данные для расчета не изменились, за исключением следующих показателей.

Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,05$.

Теоретическое и практическое количество воздуха, необходимого для сжигания единицы топлива: $L_0 = 9,53$ м³/м³; $L_{\alpha} = 10,01$ м³/м³.

Практический выход продуктов сгорания от сжигания единицы топлива с коэффициентом избытка воздуха α , $V_{\alpha} = 11,01$ м³/м³.

Средняя температура подогрева воздуха $t_b = 369$ °С.

Теплоемкость подогретого воздуха $C_b = 1,33$ кДж/(м³·К).

В результате расчетов была получена структура теплового баланса печи после технического перевооружения (табл. 2).

Основные показатели работы печи приведены ниже.

Из уравнения теплового баланса (1) найден средний расход топлива 0,073 м³/с или 263 м³/ч.

Общая тепловая мощность печи за период подъема температуры от 700 до 960 °С рассчитана по формуле (2)

$$Q_{\text{общ}} = BQ_p^{\text{н}} = 0,073 \cdot 34\,000 = 2482 \text{ кВт}.$$

Таблица 1

Тепловой баланс печи за период подъема температуры от 700 до 960 °С до технического перевооружения

Приход	кВт	%	Расход	кВт	%
Химическая теплота топлива, Q_x	6480,4	100	Теплота на нагрев металла, ΔQ_1	1079,04	16,65
			Теплота, теряемая с отходящими газами, Q_2	2923,95	45,12
			Потери теплоты с приспособлениями, $Q_{5пр}$	359,55	5,55
			Аккумуляция теплоты футеровкой печи и потери теплоты теплопроводностью, $Q_5 + Q_6$	2117,85	32,68
Суммарный приход теплоты	6480,4	100	Суммарный расход теплоты	6480,4	100

Таблица 2

Тепловой баланс печи за период подъема температуры от 700 до 960 °С после технического перевооружения

Приход	кВт	%	Расход	кВт	%
Химическая теплота топлива, Q_x	2482	87,37	Теплота на нагрев металла, ΔQ_1	1079,04	38
Физическая теплота подогретого воздуха, Q_v	358,62	12,62	Теплота, теряемая с отходящими газами, Q_2	1067,14	37,57
			Теплота, теряемая теплопроводностью через кладку, $Q_{ст}$	62,13	2,19
			Потери теплоты с приспособлениями, $Q_{спр}$	359,55	12,67
			Аккумуляция теплоты футеровкой печи, Q_6	272,76	9,6
Суммарный приход теплоты	2840,62	100	Суммарный расход теплоты	2840,62	100

Удельный расход условного топлива за период подъема температуры от 700 до 960 °С рассчитан по формуле (3)

$$b = \frac{BQ_p^H}{29,31P_M} = \frac{0,073 \cdot 34\,000}{29,31 \cdot 5,13} = 16,51 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{т}}.$$

Коэффициент полезного действия печи рассчитан по формуле (4)

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{1079,04}{2840,62} \cdot 100 = 38 \, \%.$$

Применение современных горелочных устройств рекуперативного типа позволит утилизировать 33,6 % тепла отходящих газов. Использование футеровки из волокнистых модулей приведет к снижению потерь теплоты теплопроводностью и аккумуляции тепла кладкой на 64 %. Значительные потери теплоты с приспособлениями (12,67 %) связаны с особенностью технологии нагрева металла, требующей применения тяжелой оснастки (траверсы) для подвешивания изделий при размещении их в печи. Применение новых технологий строительства камерных печей позволит значительно сократить удельный расход условного топлива (на 62 %) и повысить КПД печи на 128 %.

В соответствии с предложенным комплексом мер на ОАО «Уралмашзавод» было проведено техническое перевооружение вертикальной термической печи.

Конструкция и тепловая работа печи после технического перевооружения

В ходе технического перевооружения были проведены следующие работы:

- замена кирпичной футеровки стен и крышки печи на футеровку из современных волокнистых материалов в виде модульных блоков чешской компании Keratech;
- замена устаревших горелочных устройств на современные скоростные рекуперативные фирмы Kromshroeder с узлом утилизации тепла отходящих газов для подогрева воздуха, подаваемого на горение газа непосредственно в корпусе горелки;

– монтаж АСУ.

На рис. 1 показан общий вид верхней части рабочего пространства. Фото сделано в момент проведения пуско-наладочных работ. Крышки печи раздвинуты для визуального контроля работы горелок.

Кожух печи после технического перевооружения остался прежним, за исключением установочных карманов под новые горелки. Стенки и крышка печи футерованы современными волокнистыми материалами в два слоя. Внутренний слой из керамоволокнистых огнеупорных модулей FIBRATEC производства чешской компании Keratech, внешний – из волокнистых матов Rockwool. Под печи выполнен по кирпичной технологии в два слоя. Общий вид футеровки стен печи керамоволокнистыми блоками показан на рис. 1.

На печи установлено 11 скоростных горелок рекуперативного типа ECOMAX 5, каждая из которых имеет мощность 250 кВт. Горелки работают в импульсном режиме по принципу «включено-выключено». Горелки расположены тангенциально по одной в каждом из десяти ярусов по высоте. В нижнем ярусе расположены две горелки для компенсации теплотрат на нагрев кирпичного пода. Горелка каждого последующего яруса повернута на 90° относительно предыдущего (см. рис. 1).



Рис. 1. Общий вид верхней части рабочего пространства вертикальной печи

Горелка работает по следующему принципу: природный газ, смешиваясь в корпусе горелки с первичным воздухом с $\alpha \approx 0,5$, горит внутри камеры сгорания горелки, образуя на выходе из нее высокоскоростную струю, подсасывающую в себя подогретый рекуперативной насадкой вторичный воздух. Полученная смесь полностью сгорает в коротком факеле. Продукты сгорания удаляются эжектором, отсасывающим дымовые газы из печного пространства через рекуператор горелки. В зависимости от температуры уходящих газов, температура подогретого воздуха в рекуператоре может достигать 700 °С.

Рабочее пространство печи разделено на пять виртуальных зон управления. В каждой зоне, кроме нижней, расположены две горелки, в нижней зоне – три горелки. На каждую зону предусмотрено по две термопары. Управление температурным режимом в зоне осуществляется по показаниям основной термопары, вторая термопара служит для контроля правильности показаний основной. В случае выхода основной термопары из строя, управление осуществляется по показаниям контрольной термопары до момента устранения неисправности основной термопары.

Благодаря техническому перевооружению стало возможным проводить охлаждение садки с заданной скоростью прямо в рабочем пространстве. Охлаждение осуществляется путем продувки воздухом рабочего пространства через горелки. Возможность проведения охлаждения садки в печи значительно упростило процедуру проведения режима термообработки.

После окончания работ по техническому перевооружению были проведены гарантийные испытания печи, которые заключались в осуществлении непрерывно двух режимов: нормализация и отпуск.

Для этого в печь поместили опытную садку. На рис. 2 представлен разрез печи с опытной садкой (ротор массой 23 т), закрепленной на траверсе массой 7 т. На роторе на характерных диаметрах были закреплены восемь контрольных гибких термопар (см. рис. 2). Концы термопар были выведены через крышку печи и подключены к регистрирующей аппаратуре.

В ходе гарантийных испытаний проверялась способность автоматики печи поддерживать заданную скорость подъема температуры, поддерживать температуру как в зонах печи, так и в контрольных точках на металле, а также способность печи осуществлять охлаждение садки с заданной скоростью.

На рис. 3 представлен температурный режим печи, осуществленный при гарантийных испытаниях. Техническим заданием были установлены скорости подъема температуры, охлаждения и допустимые ее отклонения при выдержках (табл. 3).

Анализ рис. 3 показал, что на этапах подъема температур автоматика управления поддерживает заданные скорости, перепад по зонам печи составлял не более 5 °С. Перепад температур на изделии по показаниям контрольных термопар составлял не более 10 °С, не-

смотря на большую разницу диаметров частей ротора. Разница между печными и контрольными термопарами на металле при подъеме температуры печи составляла не более 100 °С, что вызвано большой массой нагреваемого ротора и быстрым нагревом поверхности нетеплопроводной футеровки печи. При выдержках разница показаний между печными и контрольными термопарами сокращалась до нуля. При охлаждении в интервале температур 960 – 700 °С средняя скорость падения температуры составила 87 °С/ч. Далее наблюдалось падение скорости охлаждения, увеличение перепада температур по длине ротора, вызванное большой разницей диаметров частей ротора, увеличение перепада температур между рабочим пространством и поверхностью ротора. В ходе охлаждения ротора при отпуске с технологически заданной скоростью 20 °С/ч, перепад температур по длине ротора составлял 5 – 30 °С, а между рабочим пространством и изделием – 10 – 50 °С.

Для сравнения теоретических и практических данных был проведен расчет удельного расхода условного

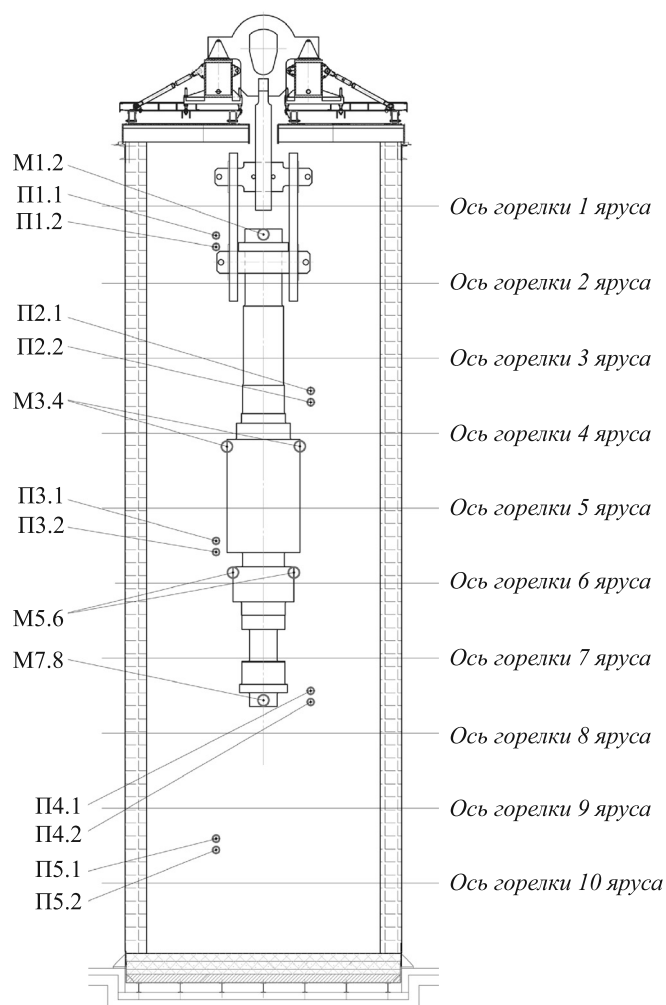


Рис. 2. Расположение контрольных термопар на садке:

П – печная термопара (стационарная);
 первая цифра (1, 2, ... 5) – номер зоны; вторая цифра:
 1 – основная термопара; 2 – контрольная термопара;
 М1 – М8 – гибкие термопары, установленные на поверхности металла

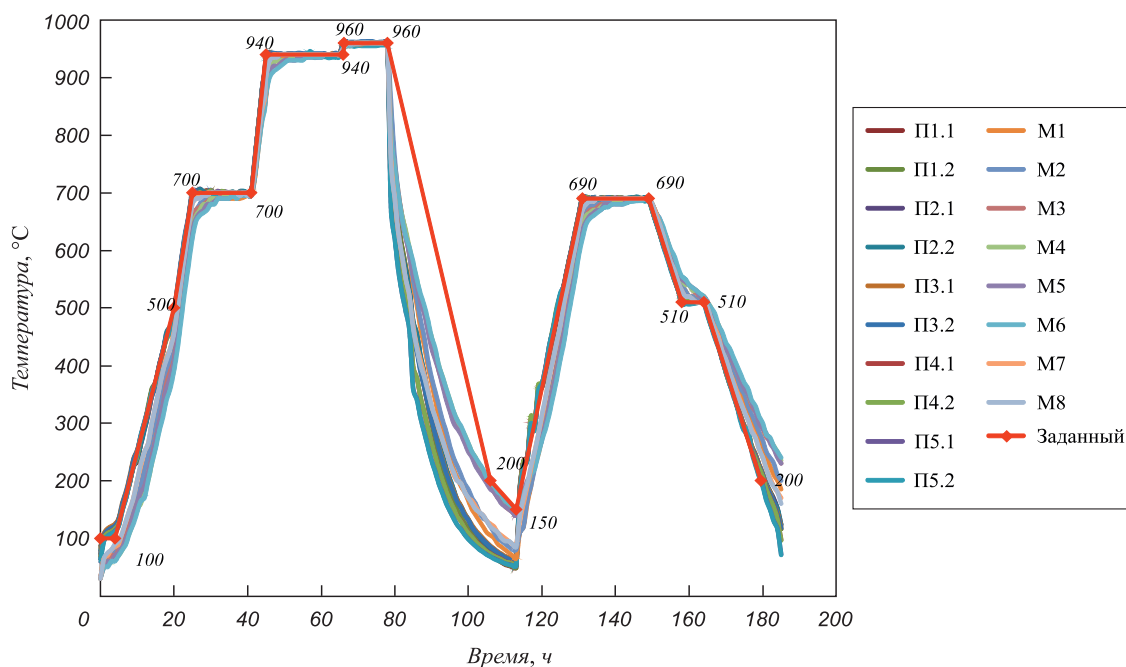


Рис. 3. Режим нормализации с отпуском при гарантийных испытаниях печи

Таблица 3

Температурный режим

Интервал температур, °C		Скорость, °C/ч
При нагреве	100 – 500	20
	500 – 700	40
	700 – 960	60
При охлаждении	960 – 100	Максимально по мощности продувки через горелки при нормализации
	690 – 200	20 (при отпуске)
Отклонение температуры при выдержках		± 5 °C

топлива для периода подъема температур в интервале 700 – 960 °C.

Средний расход топлива за этот период составил 53,67 м³/ч или 0,015 м³/с, производительность печи – 1,39 кг/с, отсюда по формуле (3)

$$b = \frac{0,015 \cdot 34\,000}{29,31 \cdot 1,39} = 12,45 \frac{\text{кг у.т.}}{\text{т}}$$

Полученный в ходе гарантийных испытаний удельный расход условного топлива меньше теоретического за тот же интервал подъема температур на 25 %.

Все показатели выявлены при постоянной производительности, температурный режим после технического перевооружения не изменялся.

Применение современных горелочных устройств, современной АСУ ТП позволило сократить перепад температур по поверхности изделия, тем самым дало

возможность уменьшить длительность теплотехнических выдержек, сделало возможным проведение охлаждения в рабочем пространстве печи при продувке через горелки.

Таким образом, применение методов и оборудования, рассмотренных в данной работе, позволит получить следующие результаты.

- В ходе гарантийных испытаний подтверждено теоретическое значение удельного расхода условного топлива и резкое снижение абсолютного расхода топлива в сравнении с таковым до технического перевооружения.

- Нагрев металла прошел в соответствии с установками технологического задания; высокое качество нагрева позволяет поднять перед технологами вопрос о сокращении времени технологических выдержек.

- Возможность проведения охлаждения изделия в рабочем пространстве позволит отказаться от дополнительного оборудования, сократить фактическое время проведения режима, устранив перегрузку изделия из печи в специальную охлаждающую камеру.

- Применение современной системы автоматизации позволяет исключить «человеческий фактор» при управлении печью, поддерживать заданные скорости изменения температуры при нагреве и охлаждении с минимальным отклонением температур по зонам печи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б.И. Китаев, Б.Ф. Зобнин и др. – М.: Металлургия, 1970. – 528 с.
2. Теория и практика теплогенерации / С.Н. Гушин, М.Д. Казяев, Ю.В. Крюченков и др. – Екатеринбург: УГТУ, 2005. – 379 с.

© 2013 г. Д.И. Спитченко, А.М. Вохмяков, Е.В. Киселев, М.Д. Казяев, Д.М. Казяев
Поступила 8 июля 2013 г.