

«Рецепт оптики» для туннельной печи

или как правильно подобрать пирометр для технологии производства огнеупорных изделий

И. Пиданов, инженер метролог, ОАО «Запорожогнеупор», г. Запорожье, Украина

Обжиг огнеупорных изделий в туннельной печи является завершающим этапом выпуска качественной продукции в огнеупорном производстве. Контроль и поддержание заданной температуры в зоне обжига - это одна из главных задач производства, которой совместно занимались в 1960-х годах, на предприятии ОАО «Запорожогнеупор», Центральное проектное конструкторское бюро (ЦПКБ) Министерства приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР и Всесоюзный институт огнеупоров [1].

Проводились измерения и исследования температуры в зоне обжига при помощи телескопов радиационных пирометров «Тера-50» визированных на обжигаемый материал через боковые стенки печи. Для предохранения линз пирометров от перегрева и загрязнения применялся узел воздушного охлаждения. По результатам экспериментов были указаны условия, при которых измерение температуры «производится надежно и с достаточной для технологических целей точностью» [1]:

1. Размер отверстия в боковых стенках печи должен быть такой, чтобы поле визирования «Тера-50» не попадало на эти стенки;
2. Расположение отверстия в боковых стенках печи должно быть такое, чтобы в поле визирования пирометра не попадал факел и горячая противоположная стенка печи;
3. Изделия на вагонетках должны быть выложены вплотную, так как при ширине щели между ними 20 мм, в случае попадания их в поле визирования пирометра, погрешность измерения составляет 1 %;
4. Ошибку измерения температуры стационарным пирометром «Тера-50» от неполноты излучения изделия корректировать по измеренной температуре, в

месте визирования телескопа, переносным оптическим пирометром «Проминь».

С того времени на ОАО «Запорожогнеупор» соблюдают данные рекомендации и фактически технологический процесс связывают не с истинной температурой в печи, а привязывают к показаниям пирометра «Проминь», что вполне было допустимо из-за сложности определения систематической ошибки измерения температуры в зоне обжига туннельной печи.

Но жизнь не стоит на месте, конкуренция на рынке огнеупоров предъявляет более высокие требования к качеству продукции, заставляет оптимизировать технологический процесс и ужесточать требования ко всем операциям, в том числе и к точности измерения температуры.

К решению поставленной задачи необходимо подходить с двух сторон: с одной - обеспечить необходимые условия измерения для данного типа пирометра, с другой - выбрать из многообразия средств измерения высоких температур, представленных на рынке, пирометр, который обеспечит требуемую точность.

Для выполнения условий измерения температуры стационарным пирометром, не достаточно оставить отверстие неопределенной формы в кладке печи, необходимо в конкретном ее месте [1] установить визирную карбидокремниевую трубу, изготовленную из материала КА-3 внутренним диаметром 75 мм. Таким образом, обеспечим, конструктивно, центровку средств измерения - стационарный пирометр не будет захватывать факел, боковую и горячую противоположную стенку печи, и приблизим условия измерения температуры изделия к условиям измерения излучения черного тела.

Выберем несколько пирометров отличающихся между собой спектральными и оптическими характеристиками: используемый в технологии на ОАО «Запорожогнеупор» стационарный радиационный пирометр «Тера-50» и

опробованные на предприятии стационарные пирометры – «Термоскоп 800» и «Thermalert TX».

Технические характеристики данных пирометров приведены в таблице №1.

Рассмотрим спектральные и оптические характеристики пирометров и их влияние на измерения истинной температуры.

Технические характеристики стационарных пирометров

Таблица №1

Наименование пирометра	Thermalert TX	Термоскоп 800	Тера 50
Модель/градуировка	HTSF	1С-ВТ1	гр. РС20
Страна	США	Россия	Украина
Диапазон измеряемых температур T , °С	500...2000	1000...2000	900...2000
Относительная инструментальная погрешность $\delta_{и}$, %	± 1 ИВ	$\pm 0,5$ ИВ	± 1 ВП
Абсолютная инструментальная погрешность $\Delta_{и}$, °С (при рабочей температуре 1500°С)	± 15	$\pm 7,5$	± 20
Длина волны λ , мкм	2,2	0,8	0...∞
Оптическое разрешение	60:1	120:1	20:1
Диаметр оптического пятна на объекте d , мм (при расстоянии 1000мм)	20	10	50
Быстродействие τ , с	0,10	0,05	4,00
Температура окружающей среды t , °С	0...70	-10...60	15...25
Примечание: ИВ - от измеряемой величины, ВП – от верхнего предела			

Напомним, пирометр – это средство измерительной техники, использующее принцип теплового излучения тела для бесконтактного измерения температуры. В приемник пирометра попадает поток излучения [3], интенсивность которого зависит от температуры тела и его излучательной способности на данной длине волны:

$$I(T) = g \int M(T, \lambda) \varepsilon(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где g – коэффициент определяющий площадь визируемого пятна;
 λ – длина волны излучения;
 T – абсолютная температура тела;
 $M(T, \lambda)$ – спектральная плотность светимости АЧТ;
 $\varepsilon(\lambda)$ – спектральная характеристика излучательной способности тела;
 $\tau(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания оптики пирометра.

Градуируются они по абсолютно черному телу (АЧТ), интенсивность излучения которого зависит от температуры и не зависит от длины волны, так как коэффициент излучательной способности АЧТ равен единице: $\varepsilon(\lambda)=1$.

$$I(T) = \sigma T^4 / \pi, \quad (2)$$

где σ - постоянная Стефана-Больцмана;

T -истинная температура тела.

При измерении температуры, так называемых, «селективных» тел, у которых с изменением спектрального диапазона изменяется излучательная способность: $\varepsilon(\lambda) = \text{var}$ при $\lambda = \text{var}$; в инфракрасной области, их коэффициент излучательной способности уменьшается с увеличением длины волны.

В нашем случае, если мы измеряем температуру этого тела пирометром «Thermalert TX» на длине волны $\lambda = 2,2$ мкм, то его коэффициент излучательной способности, ниже, чем при измерении пирометром «Термоскоп 800» на длине волны $\lambda = 0,8$ мкм.

Это значит, что показания, в данном случае, пирометра «Термоскоп 800» будет ближе к истинному значению, чем «Thermalert TX».

В отличие от пирометров частичного излучения, пирометр полного излучения «Тера-50» на инфракрасном участке спектра отсекает больше энергии, чем в ультрафиолетовом. В результате используемая этим пирометром интенсивность излучения возрастает с увеличением температуры быстрее, чем возрастает полная интегральная энергия, что вызывает значительное снижение погрешности. При измерении температуры, так называемых, «серых» тел, у которых с изменением спектрального

диапазона не изменяется излучательная способность: $\varepsilon(\lambda) < 1$, $\varepsilon(\lambda) = \text{const}$ при $\lambda = \text{var}$; коэффициент излучательной способности одинаков для всех перечисленных пирометров.

В этом случае истинную температуру «серого» тела T можно определить по измеренной температуре T_p :

$$T = T_p \left(1/\varepsilon(T) \right)^{1/4} \quad (3)$$

где $\varepsilon(T)$ – интегральная излучательная способность тела;

T_p – измеренная радиационная температура тела.

Насколько может, отличаться измеренная температура от истинной? Воспользуемся справочными данными [2] по излучательной способности изделий и материалов, которые приведены в таблице №2.

Если выбрать из таблицы №2 изделие – шамотный кирпич, то при температуре обжига $T=1200^\circ\text{C}$ коэффициент излучательной способности $\varepsilon(T) = 0,59$, а измеренная температура $T_p=1052^\circ\text{C}$.

Абсолютная погрешность составит 148°C . Для магнезитового кирпича абсолютная погрешность, при тех же условиях, составит 258°C .

Необходимо обратить внимание, что при изменении температуры обжига шамотных изделий (табл.№2) изменяется и коэффициент излучательной способности $\varepsilon(T)$. Как можно не зная коэффициент излучательной способности изделий, проводить измерения и при этом гарантировать точность измерения, а тем более поддерживать необходимую температуру?

Излучательная способность изделий и материалов

Таблица № 2

Изделия	Температура, $^\circ\text{C}$	Излучатель- ная способ- ность, $\varepsilon(T)$	Материал	Температура, $^\circ\text{C}$	Излучатель- ная способ- ность, $\varepsilon(T)$
Кирпич -шамотный	20	0,85	-железо	-	0,6
	1000	0,75	-алюминий	50	0,07
	1200	0,59			
-огнеупорный	1000...	0,38	-магний	-	0,86

магнезитовый	1300		-хром	50	0,1
				500	0,28
				1000	0,38

ОАО «Запорожогнеупор» выпускает широкий ассортимент продукции в зависимости от назначения, различной геометрии и состава.

В таблице № 3, 4 приведены некоторые марки изделий предприятия и их состав. Вполне очевидно, что на коэффициент излучательной способности огнеупорных изделий [2] влияют следующие факторы:

- колебания состава материала и доля примесей;
- степень шероховатости поверхности тела;
- окисление и загрязнение поверхности излучающего тела;
- наличие задымленности и пыли в поле измерения;
- неоднородность тела.

Выборочные марки магнезиальных изделий

Таблица № 3

Марка	Состав материала		
	MgO, %	Cr ₂ O ₃ , %	Пористость, %
ПХЦОС	71	13	15
ХП5	42	15	25
ПЛК-94	94	-	17

Выборочные марки шамотных изделий

Таблица № 4

Марка	Состав материала		
	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	Пористость, %
ШБ	28	-	24
МКРА	50	3	23
ШВ-42	42	1.7	21

Поэтому крайне важно [3] заранее знать $\varepsilon(\lambda, T)$ марки изделия для каждой конкретной модели пирометра и соответственно корректировать показания этих пирометров. С 2007 года в Украине значение коэффициентов излучения поверхностей тел можно определить в Национальном научном центре «Институт метрологии».

И только обеспечив корректировку проведенных измерений температуры нагретых тел, можно судить и выбрать пирометр по инструментальной погрешности (табл. № 1). В связи с этим в пирометрах «Термоскоп 800» и «Thermalert TX» предусмотрена установка коэффициента излучательной способности тела, значения которого должно быть известно с достаточно высокой точностью. В радиационных пирометров «Тера-50» такой функции нет.

Можно провести связь [3] между абсолютной погрешностью измерения ΔT_p и абсолютной погрешностью $\Delta\varepsilon(T)$:

$$\Delta T_p = T \Delta\varepsilon(T) / (4(\varepsilon(T))^{3/4}) \quad (4)$$

Например, при измерении температуры обжига $T = 1500$ °С и установленным заранее, для данного тела, коэффициентом излучательной способности $\varepsilon(T) = 0,9$ с неточностью $\Delta\varepsilon(T) = 0,05$ приведет к погрешности измерения $\Delta T_p = 20$ °С. Из таблицы №1 видно, что абсолютная погрешность пирометров при рабочей температуре $T = 1500$ °С соизмерима с погрешностью в определении $\varepsilon(T)$ и общая погрешность будет составлять $\Delta = \Delta_{\text{и}} + \Delta_{\varepsilon}$.

Но есть еще случай, когда даже зная коэффициент излучательной способности изделия можно не точно провести измерения. Щель может быть в поле зрения визирной трубы заодно и пирометра, а может вообще отсутствовать.

Необходимо рассмотреть еще один фактор, который влияет на точность измерения температуры пирометрами – это влияние щелей в садке изделий на коэффициент излучательной способности.

На рисунке 1 показан худший случай при измерении, когда щель между изделиями в 20 мм находится в центре визирования пирометра и ограничена внутренним диаметром 75 мм визирной трубы. В этом случае поле излучения изделия составит:

$$S = S_2 - S_1 =$$

где S – площадь излучения изделия $\epsilon_{и}$, мм;

S_2 - площадь ограниченная внутренним диаметром визирной трубы, мм;

S_1 - площадь излучения щели между изделиями с $\epsilon_{щ}$, мм;

Определим поправочный коэффициент на площади с излучательной способностью тела и

В общем случае для пирометра нормируемая площадь излучения определяется оптическим диаметром визируемого пятна на изделии.

Для пирометра «Тера-50» рис.2 нормируемая площадь $S_n = \pi d^2/4 = 1962 \text{ мм}^2$

при $S_3 = S_n - S_1 = \pi 50^2/4 - 20 \times 50 = 962 \text{ мм}^2$

площади излучения изделия

$$\epsilon = \epsilon_{и} + \epsilon_{щ}$$

Для пирометра «Thermalert TX» рис.3 $S_n = \pi d^2/4$

Для пирометра «Термоскоп 800» рис.4 $S_n = \pi d^2/4$

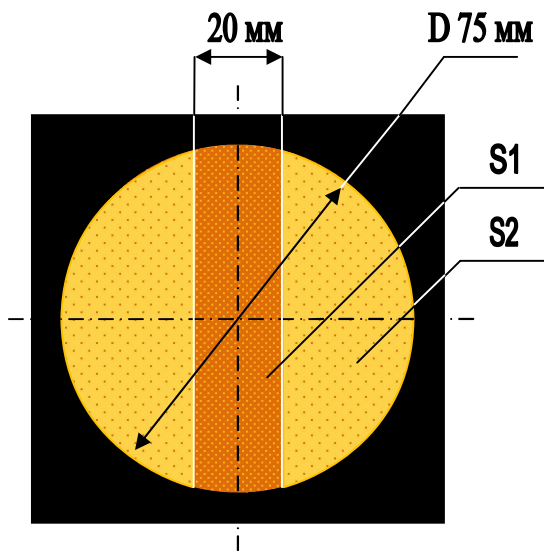


Рис. 1

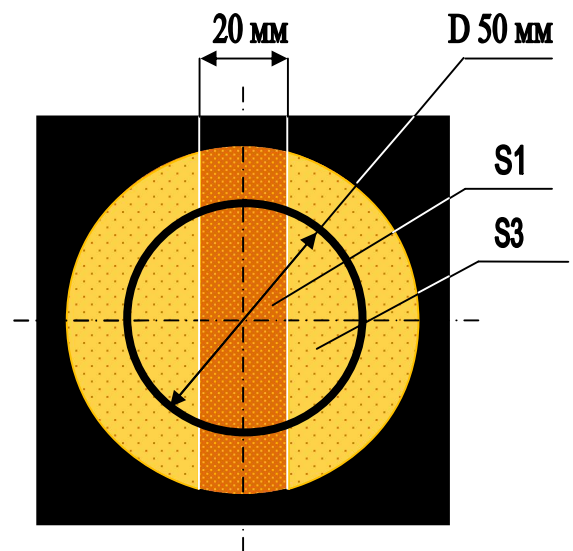


Рис. 2

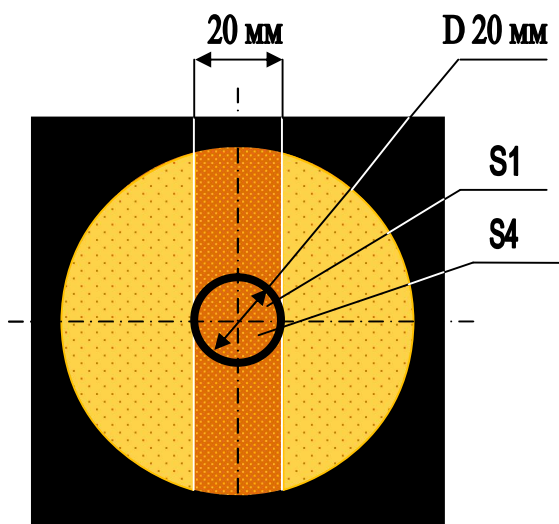


Рис. 3

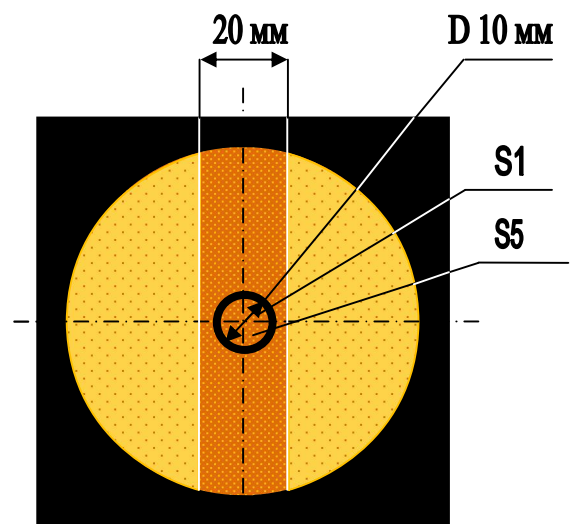


Рис. 4

Исходя из выше перечисленного[4]: определив истинную температуру в зоне обжига и значение коэффициентов излучения поверхностей «идеального» изделия, сформованного без нарушения технологического процесса, можно сделать предположение, что по отклонению температуры излучения изделия можно судить о качестве продукции на стадии обжига. Это важно при принятии решения о целесообразности продолжения процесса обжига данного объекта.

При их выборе необходимо учитывать разнообразные факторы, влияющие на достоверность показаний. Как показала практика [4], оптическим характеристикам пирометра, при производстве огнеупорных изделий, необходимо уделять внимание.

Литература:

[1]- Ксендзовский В.Р. Автоматизация печей огнеупорной промышленности.- Москва:

Издательство «Металлургия», 1967,-176с.

[2]- Геращенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К., и др. Температурные измерения/ Справочник.- Киев: Наукова думка, 1989.-704с.

[3]- Гурьев Н.В., Петриченко Г.И., Полевой В.И., Почапский С.Н. Метод высокоточного определения коэффициентов излучения материалов для пирометрических измерений//Український метрологічний журнал.-2008.- Вып.2.-С.27-31.

[4]-Пиданов И.Н. Особенности применения средств измерения высоких температур в производстве огнеупорных изделий//Метрологія та прилади.- 2007.-Вып.4-С.34-37.