УДК 537.872.31

**А.А. Вебер, Ю.Н. Пырков, В.С. Серегин,
С.Я. Русанов, И.Э. Бессарабская, В.Б. Цветков**

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Целью работы являлось получение достоверных экспериментальных данных об оптических характеристиках жаропрочной стали при высоких температурах.

Исследование образцов материалов проводилось в нагревательной камере специально разработанной установки. Защита от окисления производилась путем обдува фронтальной поверхности слабым потоком нейтрального газа.

В результате исследований разработана методика измерений и получены температурные зависимости интегральных и спектральных коэффициентов излучения и коэффициентов отражения образцов жаропрочной стали 07Х25Н16А6ФГ в диапазоне 500–1600 °С (773–1873 К) и спектральном диапазоне 0,65–10,6 мкм.

Спектральные коэффициенты излучения были получены методом прямого измерения мощности теплового излучения.

Ключевые слова: тепловое излучение, спектроскопия.

**A.A. Veber, Iu.N. Pyrkov, V.S. Seregin,
S.Ia. Rusanov, I.E. Bessarabskaia, V.B. Tsvetkov**

A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

EXPERIMENTAL STUDY OF STEEL OPTICAL CHARACTERISTICS AT HIGH TEMPERATURE

The goal of the research was the obtaining the authentic data about optical characteristics of heat resistant steel at heating up to high temperature.

The research of different materials emissivity and reflectivity properties was carried out in the specially designed heating chamber in air. The oxidation protection of the samples surface was provided by the blowing on with a weak flow of neutral gas.

As a result of the research the functions of integral and spectral emissivity and reflectivity of various materials in the temperature range of 500–1600 °С (773–1873 К) and wavelengths range of 0,65–10,6 μm are obtained.

The spectral emissivity values have been received as a method of direct measurement of the thermal radiation power, and also by an indirect method of reflectivity measurement. Comparison of the results obtained by these two methods increases a correctness of the received data.

Keywords: thermal radiation, spectroscopy.

1. Введение

В современной технике для создания модулей и установок, длительно работающих при высоких температурах, широко используются различные металлы и металлические сплавы.

При использовании таких материалов в условиях высоких температур излучение их поверхности вносит значительный вклад в суммарный теплообмен. Зачастую также требуется определить реальную температуру работающего устройства, что может быть осуществлено только бесконтактным способом с использованием пирометрических методов измерений. Для учета лучистого теплообмена и определения температуры нагретой металлической детали необходимы экспериментальные зависимости интегрального и спектрального коэффициентов излучения ϵ от температуры. В технической литературе эти зависимости приведены для ограниченного числа металлов и сплавов, причем, как правило, для полированных образцов в вакууме.

Известно, что даже в идеальном случае твердых веществ с оптически гладкой поверхностью ни одна из современных теорий не может в большинстве случаев обеспечить точность расчетов, необходимую для практики. Поэтому единственным способом получения надежных данных по излучательным и отражательным характеристикам различных конструкционных материалов в настоящее время является эксперимент. Состояние поверхности (окисление, загрязнение) и качество ее обработки оказывают значительное влияние на величину излучательной способности. Поэтому в ряде случаев необходимо производить измерения с образцами, имеющими качество обработки и состояние поверхности, соответствующее условиям их применения.

Целью работы являлось получение достоверных данных об оптических характеристиках некоторых жаропрочных металлов и сплавов при высоких температурах в условиях, приближенных к условиям эксплуатации.

2. Экспериментальные методы

Исследование образцов материалов проводилось в нагревательной камере специально разработанной установки (рис. 1).

В ходе работы проводились исследования влияния температуры, направления излучения и длины волны на излучательные и отражательные характеристики материалов. Выделение длины волны измерения

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

осуществлялось с помощью интерференционных фильтров. В дополнение к фильтрам использовались оптические фильтры для отсечки паразитного света во всем диапазоне работы фотоприемника.

Объектом исследования являлись образцы термостойких конструкционных материалов, включающие в себя образцы жаропрочной стали 07X25H16AГ6Ф без покрытия и хромированные.

В результате исследований разработана методика измерений и получены зависимости интегральных и спектральных коэффициентов излучения и коэффициентов отражения различных материалов от температуры в диапазоне 500–1600 °С (773–1873 К) и длины волны (0,65–10,6 мкм).

Спектральные коэффициенты излучения были получены как методом прямого измерения мощности теплового излучения, так и косвенным методом измерения коэффициента отражения.

При прямом измерении излучательной способности спектральный направленный коэффициент излучения в данном методе определяется следующим образом:

$$\epsilon_{\lambda 0} = (W_{\lambda s} - W_{\text{помехи}\lambda}) / W_{\lambda \text{АЧТ}}, \quad (1)$$

где $W_{\lambda s}$ – спектральная мощность теплового излучения образца, регистрируемого в телесном угле $\Delta\Omega$ и установленного нормально к линии визирования; $W_{\text{помехи}\lambda}$ – величина спектральной мощности излучения тепловой камеры, отраженного от поверхности исследуемого образца; $W_{\lambda\text{АЧТ}}$ – спектральная мощность теплового излучения модели АЧТ, регистрируемого в телесном угле $\Delta\Omega$.

Аналогично определяется интегральный коэффициент черноты:

$$\varepsilon_0 = (W_{s0} - W_{\text{помехи}0})/W_{\text{АЧТ}}, \quad (2)$$

где W_{s0} – полная мощность теплового излучения образца, установленного нормально к линии визирования, регистрируемого в телесном угле $\Delta\Omega$; $W_{\text{помехи}0}$ – величина полной мощности излучения тепловой камеры, отраженного от поверхности исследуемого образца; $W_{\lambda\text{АЧТ}}$ – спектральная мощность теплового излучения модели АЧТ, регистрируемого в телесном угле $\Delta\Omega$.

Величины $W_{\text{помехи}\lambda}$ и $W_{\text{помехи}0}$ определяются в ходе калибровочных экспериментов, проводимых с пробными образцами по этой же методике.

Сравнение результатов, полученных двумя методами, показывает степень корректности установленных данных.

3. Результаты измерений

При определении нормальной излучательной способности методом измерения мощности теплового излучения в тепловую камеру устанавливались два металлических образца и модель АЧТ. Количество устанавливаемых образцов диктовалось размерами области с равномерным распределением температуры.

При каждой температуре проводилось измерение мощности теплового излучения (интегральной и спектральной) всех образцов и модели АЧТ. При этом измерения проводились не менее трех раз для каждой спектральной точки для каждого образца и модели АЧТ. Особое внимание обращалось на поддержание нужного состава атмосферы при исследовании образцов металлов. После эксперимента оценивалось состояние поверхности образцов.

На рис. 2 приведены данные по интегральному коэффициенту черноты для образцов стали 07Х25Н16АГ6Ф без покрытия и хромированных.

Измерения стальных образцов проводились до температуры 1400 °С. При больших температурах происходило размягчение образцов с изменением формы и последующее плавление.

Рис. 2. Интегральный коэффициент черноты для образцов стали 07Х25Н16АГ6Ф: *а* – без покрытия; *б* – с покрытием хромом

Видно, что интегральный коэффициент черноты хромированных стальных образцов стабильно меньше, чем в случае образцов без покрытия, вплоть до момента, когда происходит полное окисление поверхности и исчезновение хромирования (1300–1400 К). Далее излучательная способность стальных образцов определяется излучательной способностью окислов железа. Общий ход кривых температурной зависимости стали, величина полной нормальной излучательной способности и скорость окисления сходны с опубликованными ранее результатами (см., например, [1]). Столь быстрого окисления поверхности стальных образцов, как указано, например в [2] (20–30 мин до полного, устойчивого окисления поверхности при температуре около 1350 К), в нашем случае не наблюдалось. Это может быть связано с тем, что в нашей работе исследовалась именно жаропрочная сталь, устойчивая к окислению.

При этом характеристики поверхности образцов обоих типов одинаковы: микроцарапины имеют глубину до 0,2 мм и резкие края, среднее значение ширины царапин – 0,025 мм, среднее значение шага царапин – 0,265 мм.

Следует отметить, что при внешнем сходстве температурных зависимостей интегрального коэффициента черноты температурные зависимости спектральных коэффициентов черноты сильно отличаются (рис. 3).

Представленные результаты демонстрируют, что в средней ИК-области спектра все исследованные металлы демонстрируют монотонный

Рис. 3. Спектральный нормальный коэффициенты черноты для образцов сталь 07Х25Н16АГ6Ф: а – без покрытия; б – с покрытием Cr. Температура измерения указана в табличках справа от графиков

рост нормальной излучательной способности с повышением температуры. При этом излучательная способность хромированной стали, как и следовало ожидать, остается ниже соответствующих значений для стали без покрытия вплоть до момента полного окисления хромированного покрытия (около 1300 К, время достижения данной температуры около 5 ч). Измеренные значения излучательной способности стали и температурная зависимость до начала влияния окисления поверхности примерно соответствуют известным (см., например, [3, 4]). Точное сопоставление не представляется возможным как из-за разного состава исследованных образцов, так и из-за разного состояния их поверхности.

4. Выводы

Проведенные исследования показали, что нормальный интегральный коэффициент черноты хромированных стальных образцов стабильно меньше, чем в случае образцов без покрытия вплоть до момента, когда происходит полное окисление поверхности и исчезновение хромирования (1300–1400 К). При более высоких температурах интегральная излучательная способность стальных образцов определяется излучательной способностью окислов железа и достигает величины около 0,8.

Список литературы

1. Experimental Investigation of Emissivity of Steel / Y.F. Liu, Z.L. Hu, D.H. Shi, K. Yu // *Int. J. Thermophysics*. – 2013. – Vol. 34. – P. 496–506.
2. William R. Wade, Measurements of total hemispherical emissivity of various oxidized metals at high temperatures / National Advisory committee of aeronautics. – 1958. – Technical note 4206.
3. Chang-Da W. Study of Steel Emissivity Characteristics and Application of Multispectral Radiation Thermometry (MRT) // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2011. – Vol. 20 (2). – P. 289.
4. Таймаров М.А. Исследование излучательной способности конструкционных материалов и пылегазовых сред применительно к расчету теплообмена в котлах-утилизаторах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Казань, 1997. – 294 с.

References

1. Liu Y.F., Hu Z.L., Shi D.H., Yu K. Experimental Investigation of Emissivity of Steel. *Int. J. Thermophysics*, 2013, vol. 34, pp. 496-506.
2. William R. Wade, Measurements of total hemispherical emissivity of various oxidized metals at high temperatures. National Advisory committee of aeronautics. 1958. Technical note 4206.
3. Chang-Da W. Study of Steel Emissivity Characteristics and Application of Multispectral Radiation Thermometry (MRT). *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, vol. 20 (2), 289 p.
4. Taimarov M.A. Issledovanie izluchatel'noi sposobnosti konstruktsionnykh materialov i pylegazovykh sred primenitel'no k raschetu teploobmena v kotlakh-utilizatorakh [The study emissivity of construction materials and dust environments in relation to the calculation of heat exchange in a waste heat boilers]. Thesis of Doctor's degree dissertation, Kazan', 1997, 294 p.

Получено 16.10.2014