



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015106950/28, 27.02.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
27.02.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 27.02.2015

(45) Опубликовано: 20.09.2016 Бюл. № 26

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: CZ 201200175 A3, 25.09.2013. JP 2008145344 A, 26.06.2008. RU 2468360 C1, 27.11.2012. **ВИННИКОВА А.Н.** и др. Методика измерений и экспериментальная установка для определения интегральной нормальной излучательной способности конструкционных материалов в интервале температур от 1200 до 3000K, ТВТ, 1969, т7, вып.1, с.121-126. SU 1774192 A1, 07.11.1992. (см. прод.)

Адрес для переписки:

125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2, ОИВТ РАН, зам. директора Зейгарник В.А.

(72) Автор(ы):

**Брыкин Михаил Владимирович (RU),
Васин Андрей Андреевич (RU),
Шейндлин Михаил Александрович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Российская Федерация, от имени которой
выступает Государственная корпорация по
атомной энергии "Росатом" (Госкорпорация
"Росатом") (RU),
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Объединенный институт
высоких температур Российской академии
наук (ОИВТ РАН) (RU)**

(54) СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА (ВАРИАНТЫ)

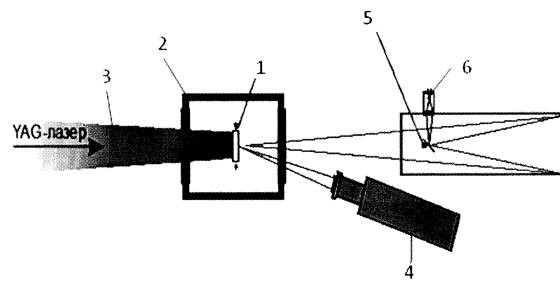
(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике. Способ измерения интегральной излучательной способности заключается в закреплении эталонного образца в виде абсолютно черного тела (АЧТ) и в отдельной вакуумной камере исследуемого образца твердого тела, нагревании эталонного образца указанного образца до установленной температуры T поверхности образца твердого тела и регистрации термодатчиком лучистой энергии, испускаемой с поверхности исследуемого образца для сравнения с АЧТ, коэффициент излучения которого известен, при одинаковой температуре поверхности T . Нагревание исследуемого образца твердого тела до установленной температуры T на его поверхности осуществляют прямым лазерным излучением. В качестве

термодатчика лучистой энергии использован яркостный пирометр при известности на длине волны пирометра спектральной излучательной способности или спектропирометр. Зеркальный пирометр полного излучения привязан к абсолютной энергетической шкале через калиброванную модель эталонного образца, при этом зеркальную систему зеркального пирометра полного излучения направляют на исследуемый образец и осуществляют регистрацию температуры T на поверхности исследуемого образца. Интегральная излучательная способность исследуемого образца твердого тела определяется как $\epsilon(T)=Q(T)/Q_{\text{АЧТ}}(T)$, где $Q(T)$ и $Q_{\text{АЧТ}}(T)$ соответственно удельные потоки теплового излучения реальной поверхности и (АЧТ) при одинаковой температуре T .

Изобретение обеспечивает упрощение способа и повышение достоверности результатов измерений

за счет исключения влияния радиационных потоков тепла. 3 н.п. ф-лы, 3 ил.



ФИГ. 3

(56) (продолжение):

JP 61175534 A, 07.08.1986. ТУРАЕВА У.Ф. и др. Определение излучательной способности стационарным методом. Молодой ученый, N7(54), 2013, С.83-86. RU 2521131 С2, 27.06.2014.

RU 2 5 9 7 9 3 7 C 1

RU 2 5 9 7 9 3 7 C 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2015106950/28, 27.02.2015

(24) Effective date for property rights:
27.02.2015

Priority:

(22) Date of filing: 27.02.2015

(45) Date of publication: 20.09.2016 Bull. № 26

Mail address:

125412, Moskva, ul. Izhorskaja, 13, str. 2, OIVT
RAN, zam. direktora Zejgarnik V.A.

(72) Inventor(s):

Brykin Mikhail Vladimirovich (RU),
Vasin Andrej Andreevich (RU),
SHejndlin Mikhail Aleksandrovich (RU)

(73) Proprietor(s):

Rossijskaya Federatsiya, ot imeni kotoroj
vystupaet Gosudarstvennaya korporatsiya po
atomnoj energii "Rosatom" (Goskorporatsiya
"Rosatom") (RU),
Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe
uchrezhdenie nauki Obedinennyj institut
vysokikh temperatur Rossijskoj akademii nauk
(OIVT RAN) (RU)

(54) **METHOD OF MEASURING INTEGRAL RADIATING ABILITY BY DIRECT LASER HEATING (OPTIONS)**

(57) Abstract:

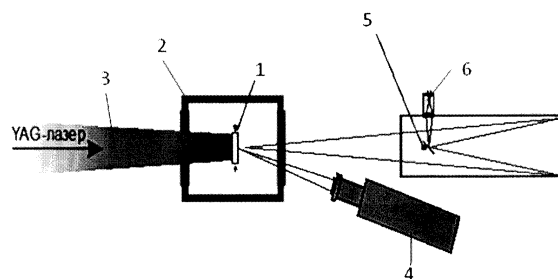
FIELD: measuring equipment.

SUBSTANCE: invention relates to measurement equipment. Method of measuring of the integral emissivity is fixation of reference sample in the form of an absolutely black body (ABB) in a separate vacuum chamber of the analyzed sample of solid body, heating of the reference sample of specified sample to set temperature T of the surface of sample of solid body and recording radiant energy emitted from the surface of the studied sample by temperature transmitter to compare it with ABB, coefficient of radiation of which is known at the same surface temperature T. Heating of the studied sample of solid body to set temperature T on its surface is done by direct laser radiation. Luminance pyrometer may be used as temperature transmitter of radiant energy if the spectral emissivity at the wavelength of the pyrometer is known, spectral pyrometer may also be used as temperature transmitter. Mirror pyrometer of full radiation is connected with absolute power scale through calibrated model of reference sample, upon that one directs mirror system

of the mirror pyrometer of full radiation at the studied sample and records the temperature T on surface of the studied sample. Integral emissivity of the studied sample of solid body is defined as $\varepsilon(T) = Q(T)/Q_{ABB}(T)$, where Q and $Q_{ABB}(T)$ respectively are specific threats of thermal radiation of real surface and (ABB) at the same temperature T.

EFFECT: invention provides a simple method and high reliability of results of measurements due to eliminating the influence of radiation heat fluxes.

3 cl, 3 dwg



ФИГ. 3

Изобретение относится к измерительной технике. Изобретение относится к области высокотемпературной техники исследований излучательных свойств материалов и может использоваться для определения интегральной излучательной способности материалов и покрытий, а при известной излучательной способности одного материала позволяет определить абсолютное значение интегральной излучательной способности другого материала. Изобретение относится к новому методу измерения интегральной излучательной способности твердых материалов при высоких температурах с помощью прямого лазерного нагрева.

Интегральная излучательная способность определяется как $\epsilon(T)=Q(T)/Q_{\text{АЧТ}}(T)$, где $Q(T)$ и $Q_{\text{АЧТ}}(T)$ соответственно удельные потоки теплового излучения реальной поверхности и абсолютно черного тела (АЧТ) при той же температуре.

Все методы измерения интегральной излучательной способности можно условно разделить на радиационные и калориметрические. В первом случае с помощью детектора полного излучения измеряется лучистый поток от измеряемой поверхности и сравнивается с потоком излучения АЧТ. Во втором случае поток излучения определяется из теплового баланса, учитывающего потери тепла за счет излучения: $Q(T)=\epsilon(T)\sigma T^4$, где σ - постоянная Стефана-Больцмана.

Большинство экспериментальных методов определения интегральной излучательной способности материалов сводится к созданию в экспериментальной установке стационарного состояния исследуемого образца с хорошо контролируемыми или надежно измеряемыми величинами полного энерговклада и всевозможных механизмов тепловых потерь с поверхности за исключением собственного излучения. Обычно используются образцы небольшого размера (термически тонкие), что обеспечивает практически однородное поле температуры по всему объему, включая излучающую поверхность. Тепловые потери за счет собственного излучения рассчитываются затем на основании уравнения суммарного энергетического баланса.

В работах (Allen R.D., Glasier L.F., JR., Jordan P.L.. Spectral Emissivity, Total Emissivity, and Thermal Conductivity of Molybdenum, Tantalum, and Tungsten above 2300 K // Journal of Applied Physics. 1960. Vol. 31. No. P. 1382 - 1387; Matsumoto T., Cezairliyan A., Basak D. Hemispherical Total Emissivity of Niobium, Molybdenum, and Tungsten at High Temperatures Using a Combined Transient and Brief Steady-State Technique // International Journal of Thermophysics. 1999. Vol. 20. No. 3. P. 943-952; Cagran C., Pottlacher G., Rink M., Bauer W. Spectral Emissivities and Emissivity X-Points of Pure Molybdenum and Tungsten // International Journal of Thermophysics. 2005. Vol. 26. No. 4. P. 1001-1015), например, использовался нагрев тонких проволок исследуемого материала электрическим током, что позволяло надежно фиксировать суммарный энерговклад. Измерение истинной температуры образца, знание которой необходимо для расчета интегральной излучательной способности, проводится при относительно небольших температурах с помощью термопар или, что более предпочтительно, с помощью бесконтактного пирометрического метода, исключающего дополнительные трудно контролируемые возмущения в суммарную теплоотдачу и позволяющего измерять более высокие температуры. Отметим, что в каждом отдельном эксперименте определяется интегральная излучательная способность при одной температуре.

Так в широко используемом «радиационном методе» необходимо измерение трех параметров - температуры и плотности потока излучения, а также конвективных теплопотерь (при исключении конвективных теплопотерь, как видно, необходимо измерение двух величин). Для исключения конвективных теплопотерь и необходимости

измерения потока излучения в работах (Спэрроу Э. М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. - М.: Энергия, 1977. - 294 с; Теплоэнергетика и теплотехника, Общие вопросы, книга 1. Справочник под ред. Григорьева В.А., Зорина В.М. М.: Энергоиздат, 1987. - 455 с.) была предложена упрощенная нестационарная методика определения интегральной излучательной способности (ϵ_T) и предлагалось исключение конвективных теплопотерь за счет проведения эксперимента одновременного с двумя образцами: один с известной ϵ_T , второй - рабочий. Обе методики были основаны на том, что при одинаковых температурах и для одинаковых перепадов температур оба образца имеют одинаковые конвективные теплопотери. Однако, как известно, для нестационарных методов необходимы образцы с одинаковыми размерами и с известными теплофизическими характеристиками (теплоемкость, масса), при этом также необходимо измерять время. Оба эти метода были предложены, но не были реализованы, не была проведена и оценка погрешности этих методов.

В статье «Определение излучательной способности стационарным методом» авторов У.Ф. Тураева, Ш.Ф. Тураева, С.С. Ибрагимов, напечатанной в журнале «Молодой ученый», 2013, №7, стр. 83-86 и размещенной на сайте «Молодой УЧЕНЫЙ» в сети Интернет по адресу: <http://www.moluch.ru/archive/54/6786/>, утверждается, что возможно развитие предложенных выше методов и разработка на этой основе стационарного метода - измерение излучательной способности по равновесным температурам.

Способ заключается в следующем. Берутся две тонкие плоские пластины из одного рабочего материала толщиной порядка 1-5 мм, и одна из них покрывается сажей. Эти образцы, рабочий и «черный», нагреваются с помощью источника излучения. Измеряются равновесные температуры образцов. Далее, учитывая, что перепады температур в образцах малы, меньше $0,1^\circ$, а также пренебрегая теплопотерями через боковые стороны пластин и теплопотери через опорные ножки, можем записать следующие уравнения баланса.

$$2 \cdot \epsilon_1 \cdot s \cdot T^4 + 2 \cdot \alpha_{K1} \cdot (T - T_0) = \alpha_1 \cdot E_C + 2 \cdot \epsilon_1 \cdot s \cdot T_{II}^4 \quad (1)$$

$$2 \cdot \epsilon_2 \cdot s \cdot T_a^4 + 2 \cdot \alpha_{K2} \cdot (T_a - T_0) = \alpha_2 \cdot E_C + 2 \cdot \epsilon_1 \cdot s \cdot T_{II}^4 \quad (3)$$

При температурах источника, близких к температурам нагрева, можно также считать, что $\alpha_1 = \epsilon_1$ и $\alpha_2 = \epsilon_2$ (3)

В этих уравнениях известны температуры образца и «АЧТ», температуры стен (измеряются), температура окружающего воздуха, измеряется и плотность падающего излучения E , а неизвестными являются коэффициенты конвективной теплоотдачи α_{K1} , α_{K2} .

Т. е. из уравнения (2) мы определяем коэффициент конвективной теплоотдачи α_{K1} . Найдем связь между α_{K2} и α_{K1} . В общем характер конвективной теплоотдачи на обоих образцах одинаков (одинаковые условия), поэтому различия между ними обусловлены различием в температурах рабочего образца и «АЧТ».

Как показали предварительные эксперименты, различие между температурами рабочего образца и «АЧТ» находится на уровне 10-15°, при этом различие между α_{K2} и α_{K1} не превышает 5%. Т.е. можно принять, что $\alpha_{K1} = \alpha_{K2}$. Тогда, определяя α_{K3} из (2) и подставляя вместо α_{K1} из (1), определяем излучательную способность образца.

Отмечается, что в случае вынужденной конвекции коэффициент теплоотдачи не зависит от температуры образцов, а зависит только от температуры окружающего воздуха.

В статье также приводятся основные составляющие относительной погрешности d для этого способа. Они складываются из следующих случайных погрешностей:

Погрешность допущения о малости теплопотерь с боковой поверхности - $d_S = 100\% \cdot (S_B / (2 \cdot S)) = 100\%$, которая при $r_S = 30$ мм и $h = 2$ мм равна $d_S = 100\% \cdot (h / r_S) = 100 \cdot 0.033 = 3.3\%$;

Погрешность определения температур образца и «АЧТ» термопарами - $d_{TO} = 100\% \cdot (0.5/90) = 0.6\%$;

Погрешность определения плотности падающего потока - $d_{ПАД} = 5\%$ (по паспорту);

Погрешность определения температуры окружающего воздуха - $d_B = 100\% \cdot (0.2/25) = 0.8\%$;

Погрешность допущения, что $\alpha_{K1} = \alpha_{K2}$, составляет в случае естественной конвекции - $d_{\alpha K} = 5\%$, в случае вынужденной конвекции $d_{\alpha K} = 0\%$;

Погрешность определения температуры «стен» - $d_{СТ} = 100\% \cdot (0.5/30) = 1.7\%$;

Суммарную относительную погрешность d будем определять по формуле [5].

$$d = (d_S^2 + d_{TO}^2 + d_{ТАЧТ}^2 + d_{ПАД}^2 + d_B^2 + d_{\alpha K}^2 + d_{СТ}^2)^{0.5} = 8\% \quad (4)$$

Этот способ позволяет практически для всех тел определить интегральную излучательную способность и параметр селективности к солнечному излучению по ее равновесной температуре, причем так как равновесные температуры серого и черного тела одинаковы, то в качестве серого тела можно использовать зачерненный рабочий образец.

Как видно из статьи, разработан способ определения излучательной способности стационарным методом путем обеспечения нагрева двух образцов, один из которых АЧТ дает неточное измерение, в результате которого получают информацию, достоверность которой определена в рамках погрешностей в 5%. При этом, как видно из рассмотренного описания способа, некоторые параметры выбраны по данным паспорта, или по принятому утверждению, или по средним установленным значениям. Естественно, что использование уточняющих величин условного порядка не может позволить провести точное определение интегральной излучательной способности поверхности твердого образца.

Так, из уровня техники известен способ измерения интегральной излучательной способности твердых материалов при высоких температурах, описанный в кн. А.Г. Коротких «Теплопроводность материалов», Томск, Издательство Томского политехнического университета, 2011, рекомендовано в качестве учебного пособия Редакционно-издательским советом Томского политехнического университета, стр. 35-38 (это решение принято в качестве прототипа).

Определение интегрального коэффициента излучения радиационным методом состоит в сравнительном измерении специальным термоприемником лучистой энергии, испускаемой исследуемым и абсолютно черным телом или телом, коэффициент излучения которого известен. Экспериментальные установки для определения ϵ радиационным методом имеют устройство для нагревания образца до заданной температуры, приемник излучения и диафрагму.

Для приемников с линейной характеристикой наиболее простым методом определения коэффициента излучения является визирование приемника на исследуемый объект и на черное тело или эталонный излучатель с известным коэффициентом излучения ϵ . При этом температура эталонного и исследуемого образцов должна быть одинаковой. Линейность приемника излучения может быть обеспечена только в определенном интервале потоков излучения и с ограниченной точностью. Поэтому в общем случае приемник излучения следует считать нелинейным. Тогда наиболее распространенной

схемой осуществления радиационного метода является схема, основанная на равенстве сигналов от исследуемого образца и АЧТ (эталоны) с разными температурами.

Для определения коэффициента излучения широко используют выпускаемые промышленностью радиационные пирометры. Зеркала и линзы вносят искажения в тепловой поток, проходящий к приемнику излучения. Коэффициенты отражения и пропускания зеркал и линз существенно зависят от длины волны. Поэтому погрешности определения существенно зависят от материала линз, зеркал и смотровых окон. С учетом этого радиационный линзовый пирометр или термодатчик, воспринимающий излучение через стекло, измеряют интегральный коэффициент излучения лишь в пределах пропускания оптической системы:

Как правило, радиационный метод осуществляется при условии, когда температура исследуемого объекта выше температуры приемника и поток излучения поступает от объекта к приемнику. Для надежного измерения этого потока различие температур между объектом и приемником не должно быть очень малым. Радиационный метод получил наибольшее распространение при исследовании неэлектропроводных материалов.

Сама задача учета радиационных потоков тепла от нагревателя печи и от ее элементов, паразитных засветок и многих других параметров окружающей испытываемый образец среды относится к категории чрезвычайно сложной. Эта сложность определена тем, что сам процесс проведения действий по нагреву образца твердого тела не представляет сложности, но последующие математические расчеты, которые должны учитывать влияние окружающей среды, на которую воздействует не только сам нагретый образец, но и печь, относятся к тем действиям, от которых зависит достоверность получаемых данных об истинной интегральной излучательной способности поверхности твердого тела.

В настоящее время работы по совершенствованию способов измерения интегральной излучательной способности поверхности твердого тела в общем плане сводятся именно к попыткам исключения из расчетной части эксперимента условно установленных составляющих или составляющих с усредненными величинами. Исключение из расчетов этих неоднозначно точных составляющих позволяет снизить искажение значения излучательной способности. Но решение такой задачи невозможно без внесения изменений в материальную часть эксперимента, то есть непосредственно в саму установку, в которой производится нагревание образца тепловым воздействием.

Известен способ измерения интегрального коэффициента излучения поверхности различных материалов в широком диапазоне температур 1200-3000°K (Винникова А.Н., Петров А.Н., Шейндлин А.Е. «Методика измерений и экспериментальная установка для определения интегральной нормальной излучательной способности конструкционных материалов в интервале температур от 1200 до 3000 К» // ТВТ. - 1969. - Т. 7, №1, стр. 121-126). Определение интегрального коэффициента излучения указанным способом основано на использовании радиационного метода. Суть радиационного метода состоит в сравнительном измерении специальным термодатчиком лучистой энергии, испускаемой исследуемым и абсолютно черным телом или телом, коэффициент излучения которого известен (эталонный образец), при одинаковой температуре поверхности Т. Интегральный коэффициент излучения рассчитывается по формуле $\epsilon(T) = \epsilon_e Q(T) / Q_e(T)$, где $Q(T)$, $Q_e(T)$ - измеренные значения мощности излучения при нагреве до температуры Т исследуемого и эталонного образцов соответственно. Это решение принято в качестве прототипа для всех заявленных объектов.

Недостаток данного способа заключается в том, что для получения численного

результата высокой достоверности необходимо учитывать величины радиационных потоков тепла от нагревателя печи и от ее элементов. Точное определение этих величин применительно к конкретному нагревательному устройству затруднительно, а применение условных усредненных значений заведомо искажает значение излучательной способности, показывая уровень интегральной излучательной способности конкретного тела по отношению к АЧП, но не ее точное численное значение.

Настоящее изобретение направлено на достижение технического результата, заключающегося в упрощении способа измерения интегральной излучательной способности твердого тела в широком диапазоне температур и повышении достоверности полученных результатов измерений за счет исключения влияния радиационных потоков тепла от нагревателя печи и от ее элементов.

Указанный технический результат достигается тем, что в способе измерения интегральной излучательной способности, заключающемся в закреплении в отдельной вакуумной камере исследуемого образца твердого тела, нагревании указанного образца до установленной температуры T на его поверхности и регистрации термодатчиком лучистой энергии, испускаемой с поверхности исследуемого образца, нагревание исследуемого образца твердого тела до установленной температуры T , контролируемой пирометром, на поверхности исследуемого образца осуществляют прямым лазерным нагревом с отключением этого нагрева при достижении на поверхности исследуемого образца указанной температуры T , а затем осуществляют охлаждение образца естественным образом за счет потерь тепла излучением с одновременной регистрацией темпа остывания образца, обусловленного суммарными радиационными потерями с его полной поверхности, для измерения термограммы охлаждения и вычисления интегральной излучательной способности по формуле:

$$\varepsilon(T) = \frac{M \frac{dh}{dT}(T) \cdot \frac{dT}{dt}}{2\pi R^2 (1 + l/R) \cdot \sigma T^4},$$

где: M , R , l - масса цилиндрического образца, его радиус и толщина (для случая, когда исследуемый образец представляет собой цилиндр); T , $h(T)$ - температура и удельная энтальпия; σ , $\varepsilon(T)$ - постоянная Стефана Больцмана и интегральная степень черноты.

Указанный технический результат достигается тем, что в способе измерения интегральной излучательной способности, заключающемся в закреплении эталонного образца в виде абсолютно черного тела и в отдельной вакуумной камере исследуемого образца твердого тела, нагревании указанного образца до установленной температуры T поверхности образца твердого тела и регистрации термодатчиком лучистой энергии, испускаемой с поверхности исследуемого образца для сравнения с абсолютно черным телом, коэффициент излучения которого известен, при одинаковой температуре поверхности T , нагревание исследуемого образца твердого тела до установленной температуры T на его поверхности осуществляют прямым лазерным излучением, а интегральная излучательная способность исследуемого образца твердого тела определяется как: $\varepsilon(T) = Q(T)/Q_{\text{АЧТ}}(T)$, где $Q(T)$ и $Q_{\text{АЧТ}}(T)$ соответственно удельные потоки теплового излучения реальной поверхности и абсолютно черного тела (АЧТ) при одинаковой температуре T .

Указанный технический результат достигается тем, что в способе измерения интегральной излучательной способности, заключающемся в закреплении эталонного образца в виде абсолютно черного тела и в отдельной вакуумной камере исследуемого

образца твердого тела, нагревании эталонного образца указанного образца до установленной температуры T поверхности образца твердого тела и регистрации термодетектором лучистой энергии, испускаемой с поверхности исследуемого образца для сравнения с абсолютно черным телом, коэффициент излучения которого известен, при одинаковой температуре поверхности T , нагревание исследуемого образца твердого тела до установленной температуры T на его поверхности осуществляют прямым лазерным излучением, в качестве термодетектора лучистой энергии использован яркостный пирометр при известности на длине волны пирометра спектральной излучательной способности или спектропирометр, при этом используют зеркальный пирометр полного излучения, привязанный к абсолютной энергетической шкале через калиброванную модель эталонного образца, зеркальную систему зеркального пирометра полного излучения направляют на исследуемый образец и осуществляют регистрацию температуры T на поверхности исследуемого образца, а интегральная излучательная способность исследуемого образца твердого тела определяется как $\epsilon(T) = Q(T)/Q_{AЧТ}(T)$, где $Q(T)$ и $Q_{AЧТ}(T)$ соответственно удельные потоки теплового излучения реальной поверхности и абсолютно черного тела (АЧТ) при одинаковой температуре T .

Указанные признаки являются существенными и взаимосвязаны с образованием устойчивой совокупности существенных признаков, достаточной для получения требуемого технического результата.

Настоящее изобретение иллюстрируется следующими чертежами:

фиг. 1 - динамика изменения температуры в центре облучаемой поверхности;

фиг. 2 - истинная (1) и рассчитанная (2) зависимости интегральной излучательной способности от температуры;

фиг. 3 - схема измерений радиационным методом.

Согласно настоящему изобретению рассматриваются новые способы измерения интегральной излучательной способности твердых тел с помощью прямого лазерного нагрева. В предлагаемом изобретении речь идет о применении радиационного и калориметрического методов как по отдельности, так и совместно. В основе лежит идея о применении лазерного нагрева исследуемого образца 1 (образец представляет собой тонкий цилиндр ($D \gg l$)), что в отличие от нагрева в традиционной печи сопротивления исключает радиационные потоки тепла от нагревателя печи и от ее элементов, что создает паразитные засветки и искажает значение излучательной способности.

Большинство экспериментальных методов определения интегральной излучательной способности материалов сводится к созданию в экспериментальной установке стационарного состояния исследуемого образца с хорошо контролируемыми или надежно измеряемыми величинами полного энерговклада и всевозможных механизмов тепловых потерь с поверхности за исключением собственного излучения. Обычно используются образцы небольшого размера (термически тонкие), что обеспечивает практически однородное поле температуры по всему объему, включая излучающую поверхность. Тепловые потери за счет собственного излучения рассчитываются затем на основании уравнения суммарного энергетического баланса.

Согласно изобретению способ измерения интегральной излучательной способности по одному из вариантов измерений заключается в закреплении в отдельной вакуумной камере 2 исследуемого образца 1 твердого тела и нагревании указанного образца до установленной температуры T на его поверхности. Затем проводят регистрацию термодетектором лучистой энергии, испускаемой с поверхности исследуемого образца.

При этом нагревание исследуемого образца твердого тела до установленной

температуры T , контролируемой пирометром, на поверхности исследуемого образца осуществляют прямым лазерным нагревом 3 с отключением этого нагрева при достижении на поверхности исследуемого образца указанной температуры T . Затем осуществляют охлаждение образца естественным образом за счет потерь тепла излучением с одновременной регистрацией темпа остывания образца, обусловленного суммарными радиационными потерями с его полной поверхности, для измерения термограммы охлаждения и вычисления интегральной излучательной способности по формуле:

$$\varepsilon(T) = \frac{M \frac{dh}{dT}(T) \cdot \frac{dT}{dt}}{2\pi R^2 (1 + l/R) \cdot \sigma T^4},$$

где M , R , l - масса цилиндрического образца, его радиус и толщина (для случая, когда исследуемый образец представляет собой цилиндр); T , $h(T)$ - температура и удельная энтальпия; σ , $\varepsilon(T)$ - постоянная Стефана Больцмана и интегральная степень черноты.

Образец, закрепленный в трехточечном держателе, нагревается лазерным излучением до определенной температуры, температура контролируется пирометром 4. Далее происходит отключение лазера, и образец охлаждается только за счет потерь тепла излучением. Измерение происходит с использованием измеренной термограммы охлаждения. Такая процедура является вариантом калориметрического метода.

Сущность предлагаемого способа заключается в использовании для нагрева термически тонкого образца, помещенного в вакуумную камеру, лазерного излучения, позволяющего реализовать стационарное состояние с практически любой температурой, вплоть до температуры плавления. Затем лазерное излучение отключается и с помощью пирометра регистрируется темп остывания образца, обусловленного только суммарными радиационными потерями с его полной поверхности.

Уравнение полного энергетического баланса в этом случае имеет вид:

$$M \frac{dh(T)}{dt} = 2\pi R^2 \left(1 + \frac{l}{R}\right) \cdot \varepsilon(T) \sigma T^4(t), \quad (1)$$

где M , R , l - масса цилиндрического образца, его радиус и толщина; T , $h(T)$ - температура и удельная энтальпия; σ , $\varepsilon(T)$ - постоянная Стефана Больцмана и интегральная степень черноты.

Определив в эксперименте $T(t)$ и dT/dt , можно для материалов с известной температурной зависимостью теплоемкости $c(T)$ рассчитать $dh/dt = c(T) \cdot dT/dt$ как функцию T и вычислить

$$\varepsilon(T) = \frac{M \frac{dh}{dT}(T) \cdot \frac{dT}{dt}}{2\pi R^2 (1 + l/R) \cdot \sigma T^4}. \quad (2)$$

Несомненным достоинством данного способа является возможность определения зависимости $\varepsilon(T)$ в одном эксперименте в широком температурном диапазоне.

Для иллюстрации возможностей предлагаемого метода было проведено его численное моделирование. Рассматривался молибденовый образец с геометрическими размерами $R=0,25$ см, $l=0,1$ см. Интегральная излучательная способность аппроксимировалась функцией $\varepsilon(T)=0,048+T/(0,012+T(0,19-T(0,12-0,023T)))$. На всей поверхности образца задавались условия радиационного охлаждения. Рассчитывалось нестационарное температурное поле в интервале времени от 0 до 5 мин. Получено, что неоднородность температурного поля на стадии остывания не превышает 2 К. На фиг. 1 показана динамика изменения температуры в центре облучаемой поверхности, а на фиг. 2 -

заложенная в расчет зависимость интегральной излучательной способности от температуры и определенная по формуле (2) на основании численного дифференцирования рассчитанной зависимости $T(t)$ (именно это является причиной небольших осцилляций в расчетной кривой).

5 Приведенные результаты показывают, что погрешность определения интегральной излучательной способности по результатам «идеального» численного эксперимента не превышает 1%. Как показали расчеты, использование более массивных образцов не приводит к заметному увеличению погрешности. Так, например, при $R=0,5$ см, $l=0,5$ см максимальная погрешность также не превышает 1%, однако в последнем случае
10 существенно возрастает время остывания образца (10 мин до температуры 600 К).

Способ измерения интегральной излучательной способности по второму примеру измерения заключается в закреплении эталонного образца в виде абсолютно черного тела и в отдельной вакуумной камере исследуемого образца твердого тела и нагревании
15 указанного образца до установленной температуры T поверхности образца твердого тела и регистрации термодатчиком лучистой энергии, испускаемой с поверхности исследуемого образца для сравнения с абсолютно черным телом, коэффициент излучения которого известен, при одинаковой температуре поверхности T . Так же как и для
20 первого примера, нагревание исследуемого образца твердого тела до установленной температуры T на его поверхности осуществляют прямым лазерным излучением, а интегральная излучательная способность исследуемого образца твердого тела определяется как $\epsilon(T)=Q(T)/Q_{\text{АЧТ}}(T)$, где $Q(T)$ и $Q_{\text{АЧТ}}(T)$ соответственно удельные
30 потоки теплового излучения реальной поверхности и абсолютно черного тела (АЧТ) при одинаковой температуре T .

Способ измерения интегральной излучательной способности по третьему примеру
25 измерения заключается в закреплении эталонного образца в виде АЧТ и в отдельной вакуумной камере 2 исследуемого образца твердого тела и нагревании эталонного образца указанного образца до установленной температуры T поверхности образца твердого тела. Затем проводят регистрацию термодатчиком 4 лучистой энергии,
30 испускаемой с поверхности исследуемого образца для сравнения с АЧТ, коэффициент излучения которого известен, при одинаковой температуре поверхности T .

Нагревание исследуемого образца твердого тела до установленной температуры T на его поверхности осуществляют прямым лазерным излучением. В качестве
термодатчика лучистой энергии используется яркостный пирометр при известности
35 на длине волны пирометра спектральной излучательной способности или спектропирометр.

А отдельный приемник излучения, исполненный в виде зеркального пирометра полного излучения, привязан к абсолютной энергетической шкале через калиброванную модель АЧТ. При этом зеркальную систему зеркального пирометра полного излучения
40 направляют на исследуемый образец и осуществляют регистрацию температуры T на поверхности исследуемого образца, а интегральная излучательная способность исследуемого образца твердого тела определяется как: $\epsilon(T)=Q(T)/Q_{\text{АЧТ}}(T)$, где $Q(T)$ и $Q_{\text{АЧТ}}(T)$ соответственно удельные потоки теплового излучения реальной поверхности и абсолютно черного тела (АЧТ) при одинаковой температуре T .

45 Схема нагрева та же самая, что и в ранее рассмотренных примерах, но после лазерного нагрева до определенной температуры T поток теплового излучения с измеряемой поверхности измеряется с помощью детектора полного излучения (например, болометра). Излучение с определенного участка поверхности направляется

на приемник излучения с помощью зеркальной оптики. Пример такой схемы измерения показан на фиг. 3. Приемник излучения с оптической системой сделан в виде отдельного блока и калибруется по радиационной энергии с помощью модели АЧТ. Такое устройство иногда называется пирометром полного излучения. Абсолютная температура образца (как и для первого примера) определяется с помощью или монохроматического пирометра с использованием известной спектральной излучательной способности или с помощью спектропирометра.

Разъяснения по фиг. 3 - схеме осуществления радиационного метода

Здесь образец 1 нагревается лазерным излучением 3 до определенной температуры.

Температура образца определяется зеркальным пирометром (поз. 4). Полный поток излучения, необходимый для измерения интегральной излучательной способности, определяется радиометром полного излучения, представляющего из себя зеркальный объектив с неселективным приемником излучения 5, который наводится на выбранную площадку образца с помощью визирного устройства 6 так, чтобы точка измерения температуры на образце и визирования радиометра совпадали. Радиометр при этом калибруется в абсолютных энергетических единицах с использованием отдельной калиброванной, модели черного тела.

Для привязки пирометра полного излучения к абсолютной энергетической шкале используется калиброванная модель черного тела. При этом калибровка проводится через оптическое окно, установленное в камере. Это окно изготавливается из материала, имеющего достаточно «плоскую», в широком спектральном диапазоне, кривую прозрачности (это, например, ZnSe, BaF₂). Выбор материала окна зависит от температурного диапазона измерений: чем ниже температура тем дальше, в сторону ИК области, должен простирается диапазон прозрачности стекла. В случае если калибровка радиационного пирометра будет проводится в единицах Кельвина, то интегральная излучательная способность определяется как $\epsilon(T) = (T_{\text{рад}}/T_{\text{ист}})^4$, где $T_{\text{рад}}$ - температура, измеренная зеркальным радиационным пирометром, а $T_{\text{ист}}$ - истинная температура образца.

Настоящее изобретение промышленно применимо, так как, по сути, реализует известные алгоритмические схемы проведения испытаний. Но внесение изменений в эти схемы, заключающиеся в применении прямого лазерного нагрева исследуемого образца, позволяет получить расширенные возможности, которые не могли быть доступны в ранее апробированных способах. Первое преимущество заключается в том, что при прямом лазерном нагреве исследуемого образца исследователи уходят от необходимости учета в расчетах величин радиационных потоков тепла от нагревателя печи и от ее элементов. В связи с этим резко повышается достоверность конечных результатов измерений до величин 1% погрешности. Второе преимущество заключается в том, что применение прямого лазерного нагрева при контроле температуры нагрева пирометром позволяет не только проводить испытания при любой выбранной температуре, но и определять зависимости $\epsilon(T)$ в одном эксперименте в широком температурном диапазоне. Это позволяет в отношении конкретного твердого материала проводить испытания по динамике его поведения при разных температурах и прогнозировать поведение материала по его отражательной способности.

Формула изобретения

1. Способ измерения интегральной излучательной способности, заключающийся в закреплении в отдельной вакуумной камере исследуемого образца твердого тела,

нагревании указанного образца до температуры T на его поверхности и регистрации термодатчиком лучистой энергии, испускаемой с поверхности исследуемого образца, отличающийся тем, что нагревание исследуемого образца твердого тела до температуры T на поверхности исследуемого образца осуществляют прямым лазерным нагревом с отключением этого нагрева при достижении на поверхности исследуемого образца указанной температуры T , а затем осуществляют охлаждение образца естественным образом за счет потерь тепла излучением с одновременной регистрацией темпа остывания образца, обусловленного суммарными радиационными потерями с его полной поверхности, для измерения термограммы охлаждения и вычисления интегральной излучательной способности по формуле:

$$\varepsilon(T) = \frac{M \frac{dh}{dT}(T) \cdot \frac{dT}{dt}}{2\pi R^2 (1 + l/R) \cdot \sigma T^4},$$

где M , R , l - масса цилиндрического образца, его радиус и толщина (для случая, когда исследуемый образец представляет собой цилиндр); T , $h(T)$ - температура и удельная энтальпия; σ , $\varepsilon(T)$ - постоянная Стефана Больцмана и интегральная степень черноты.

2. Способ измерения интегральной излучательной способности, заключающийся в закреплении эталонного образца в виде абсолютно черного тела (АЧТ) и в отдельной вакуумной камере исследуемого образца твердого тела, нагревании указанного образца до температуры T поверхности образца твердого тела и регистрации термодатчиком лучистой энергии, испускаемой с поверхности исследуемого образца для сравнения с АЧТ, коэффициент излучения которого известен, при одинаковой температуре поверхности T , отличающийся тем, что нагревание исследуемого образца твердого тела до температуры T на его поверхности осуществляют прямым лазерным излучением, а интегральная излучательная способность исследуемого образца твердого тела определяется как $\varepsilon(T) = Q(T)/Q_{\text{АЧТ}}(T)$, где $Q(T)$ и $Q_{\text{АЧТ}}(T)$ соответственно удельные потоки теплового излучения реальной поверхности и (АЧТ) при одинаковой температуре T .

3. Способ измерения интегральной излучательной способности, заключающийся в закреплении эталонного образца в виде АЧТ и в отдельной вакуумной камере исследуемого образца твердого тела, нагревании указанного образца до температуры T поверхности образца твердого тела и регистрации термодатчиком лучистой энергии, испускаемой с поверхности исследуемого образца для сравнения с АЧТ, коэффициент излучения которого известен, при одинаковой температуре поверхности T , отличающийся тем, что нагревание исследуемого образца твердого тела до температуры T на его поверхности осуществляют прямым лазерным излучением, в качестве термодатчика лучистой энергии использован яркостный пирометр при известности на длине волны пирометра спектральной излучательной способности или спектропирометр, при этом используют зеркальный пирометр полного излучения, привязанный к абсолютной энергетической шкале через калиброванную модель эталонного образца, зеркальную систему зеркального пирометра полного излучения направляют на исследуемый образец и осуществляют регистрацию температуры T на поверхности исследуемого образца, а интегральная излучательная способность исследуемого образца твердого тела определяется как $\varepsilon(T) = Q(T)/Q_{\text{АЧТ}}(T)$, где $Q(T)$ и $Q_{\text{АЧТ}}(T)$ соответственно удельные потоки теплового излучения реальной поверхности

и АЧТ при одинаковой температуре Т.

5

10

15

20

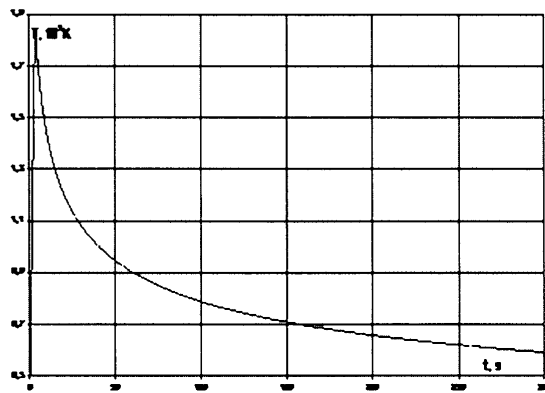
25

30

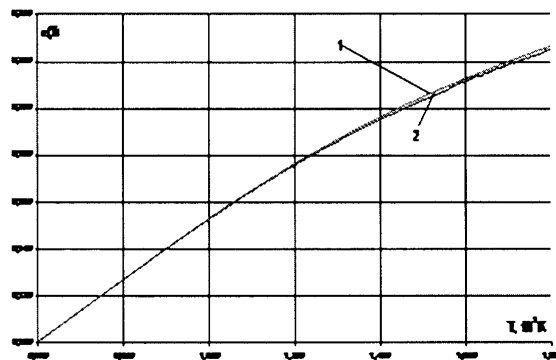
35

40

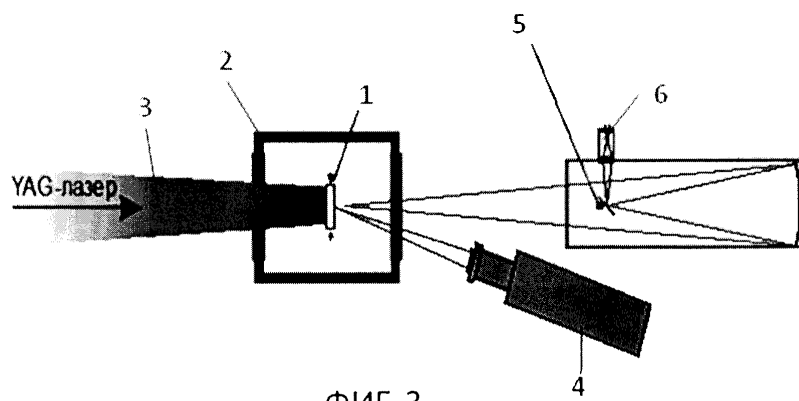
45



ФИГ. 1



ФИГ. 2



ФИГ. 3