



А.И. Ковтунов, Д.А. Семистенов,  
Т.В. Чермашенцева

# СВОЙСТВА ОГНЕУПОРОВ

---

Лабораторный практикум

Тольятти  
ТГУ  
2011

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Автомеханический институт  
Кафедра «Оборудование и технология сварочного  
производства и пайки»

А.И. Ковтунов, Д.А. Семистенов, Т.В. Чермашенцева

## **СВОЙСТВА ОГНЕУПОРОВ**

Лабораторный практикум

Тольятти  
ТГУ  
2011

УДК 666.76(075.8)

ББК 35.41

К568

Рецензенты:

д.т.н., профессор Пензенского государственного университета

*А.Е. Розен;*

заместитель главного инженера по реконструкции

ОАО «Волгоцеммаш» *А.И. Михайлов.*

Научный редактор – д.т.н., профессор *Ю.В. Казаков.*

**К568** Ковтунов, А.И. Свойства огнеупоров : лабораторный практикум / А.И. Ковтунов, Д.А. Семистенов, Т.В. Чермашенцева. — Тольятти : ТГУ, 2011. — 27 с.

В практикуме представлены четыре лабораторные работы, в которых приведена методика исследования свойств огнеупорных материалов – пористости, термической стойкости, теплоемкости и теплопроводности.

Предназначен для студентов специальности 150702 «Физика металлов», обучающихся по дисциплине «Получение и обработка металлов и соединений».

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© ГОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», 2011

## ВВЕДЕНИЕ

Огнеупорные материалы в промышленности применяются для сооружения металлургических печей и имеют температуру плавления не ниже  $1580^{\circ}\text{C}$ . Огнеупорные материалы требуются для изготовления различных нагревательных, сушильных, обжиговых и плавильных печей, а также используются для футеровки ковшей и в качестве стале-разливочного припаса. Основными требованиями, предъявляемыми к таким материалам, являются термостойкость, сопротивление высоким температурам и стойкость против химического воздействия различных расплавленных сред.

Огнеупорные изделия могут быть разделены на три группы:

- 1) огнеупорные, температура плавления  $1580\text{--}1770^{\circ}\text{C}$ ;
- 2) высокоогнеупорные, температура плавления  $1770\text{--}2000^{\circ}\text{C}$ ;
- 3) высшей огнеупорности, температура плавления выше  $2000^{\circ}\text{C}$ .

По составу и минералогическому происхождению огнеупорные материалы делятся на следующие группы.

I. Кремнекислые огнеупоры с содержанием оксида кремния до 95%. К ним относят динасовые на известковой связке и динасовые на глинистой связке.

II. Алюмосиликатные огнеупоры. Полуокислые с содержанием  $\text{SiO}_2$  до 70% и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 30% и нейтральные с содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  25–75%.

III. Огнеупорные с основными свойствами, к ним относят магнезиальные и хромитовые огнеупоры.

IV. Углеродистые и углеродсодержащие.

V. Цирконовые на основе  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ .

VI. Изделия из чистых тугоплавких оксидов:  $\text{TiO}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{MgO}$ ;  $\text{BeO}$ ;  $\text{ZrO}_2$ .

В курсе дисциплины «Получение и обработка металлов и соединений» рассматривается конструкция печей для плавки черных и цветных сплавов с рекомендуемыми типами огнеупорных футеровок. Поэтому предлагаемые лабораторные работы дают студентам возможность ознакомиться с применяемыми в металлургии огнеупорными материалами, освоить методики исследования свойств огнеупорных материалов, получить навыки по элементам научных исследований, процессам изменений и пользованию контрольно-измерительными приборами.

## Лабораторная работа 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТОСТИ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### 1.1. Цель работы

Освоить методику определения пористости огнеупорных материалов.

#### 1.2. Методические указания к самостоятельной работе

Огнеупорные изделия являются пористыми телами. Стойкость огнеупоров против шлакоразъедания зависит от пористости изделия. С увеличением пористости огнеупоров значительно возрастает поверхность их контакта с расплавом и резко падает стойкость огнеупоров против шлакоразъедания. В печах с контролируемой средой, где фильтрация газа через футеровку недопустима, используют огнеупоры с минимальной пористостью. Огнеупоры, используемые в вакуумных печах, тоже должны иметь минимальную пористость, чтобы уменьшать непроизводительную работу вакуумных насосов по откачке газов из их пор.

Размер пор, их структура и количество в огнеупорных изделиях весьма разнообразны: в легковесных огнеупорах пористость достигает 60–75%, а для большинства огнеупорных изделий она находится в пределах 15–28%, уменьшаясь до 10% и даже до нуля у плавящихся изделий. Пористость обожженных изделий представляет собой комбинацию небольших объемов, связанных между собой капиллярами, или полностью изолированных друг от друга малых объемов, заполненных газом. Поэтому можно рассматривать:

- 1) кажущуюся, или открытую, пористость, т. е. отношение объема, занятого в изделии порами, сообщающимися между собой и окружающей средой, к общему объему огнеупора, выраженному в %;
- 2) общую, или истинную, пористость, под которой понимается сумма всех пор, содержащихся в изделии;
- 3) закрытую пористость, которая представляет собой сумму пор, изолированных друг от друга и от окружающей огнеупор среды.

Величина пор в огнеупорных изделиях колеблется в весьма широких пределах – от нескольких миллиметров до молекулярных размеров. Поры, связанные между собой и с внешней средой капиллярами,

обуславливают пропитывание огнеупорных изделий расплавами. Пористость огнеупоров тесно связана с водопоглощением и водопроницаемостью, шлакопроницаемостью и газопроницаемостью. Определение пористости огнеупоров довольно сложно, поэтому пористость их определяют через водопоглощение. Обычно водопоглощение огнеупоров начинается с определения их объемной массы. Объемной массой огнеупоров называется отношение первоначальной массы сухого образца к его объему:

$$O_m = \frac{P_1}{V} \text{ кг/м}^3, \quad (1)$$

где  $P_1$  – масса сухого образца, кг;  $V$  – объем образца, м<sup>3</sup>.

Водопоглощением называется отношение массы поглощенной воды после трехчасового кипячения огнеупорного образца к первоначальной массе образца:

$$B = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $P_1$  – масса сухого образца до кипячения, г;  $P_2$  – масса влажного образца после кипячения, г.

*Кажущаяся пористость* огнеупорных изделий определяется отношением прироста массы образца после водопоглощения кипячением к его объему, выраженному в см<sup>3</sup>:

$$П_k = \frac{P_2 - P_1}{V} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $V$  – объем образца, см<sup>3</sup>.

Кажущуюся пористость можно представить как произведение объемной массы изделия на горячее водопоглощение:

$$П_k = O_m B = \frac{P_1}{V} \frac{P_2 - P_1}{P_1} = \frac{P_2 - P_1}{V}. \quad (4)$$

Отношение объемной массы образца к его плотности представляет собой долю его объема, приходящуюся на совершенно плотное тело, без пор:

$$\Delta = \frac{O_m}{\rho}. \quad (5)$$

Это равенство характеризует собой степень плотности изделия.

*Истинная, или общая, пористость* огнеупорных изделий представляет собой разность объемов пористого и сплошного тела, без пор:

$$P_u = (1 - \Delta)100 = \left(1 - \frac{O_m}{\rho}\right)100. \quad (6)$$

*Закрытая пористость.* Зная кажущуюся и истинную пористость, можно определить закрытую пористость огнеупорного изделия: закрытая пористость определяется вычитанием кажущейся пористости из истинной.

$$P_u - P_k = P_{закр}. \quad (7)$$

### **1.3. Программа работы**

1. С помощью штангенциркуля измерьте размеры образца, предоставленного преподавателем, и рассчитайте его объем.
2. С помощью весов определите массу образца огнеупора.
3. Поместите образец огнеупорного материала в емкость с водой и установите емкость в нагревательный шкаф с температурой 100° С.
4. Выдержите образец в кипящей воде в течение трех часов и определите массу образца.
5. Рассчитайте водопоглощение огнеупорного материала, кажущуюся, истинную и закрытую пористость.

### **1.4. Приспособления, инструменты и материалы**

Для определения пористости используют образцы следующих огнеупоров: шамот, магнезит, хромомагнезит, динас. Размеры образцов контролируются штангенциркулем. Вес образцов контролируют с помощью весов ВЭУ-2-0,5/1. Нагрев и выдержка проводятся в нагревательном шкафу Heraeus UT 6060.

### **1.5. Содержание отчета (прил. 1, 2)**

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Краткое изложение методики исследования пористости огнеупорных материалов.
4. Исходные геометрические размеры образцов, вес и результаты исследований и расчетов.
5. Выводы.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. На какие свойства огнеупоров влияет их пористость?
2. Какова пористость огнеупорных материалов?
3. Что понимается под истинной пористостью огнеупоров?
4. Как определяется кажущаяся пористость огнеупорных материалов?
5. Что представляет собой закрытая пористость огнеупоров?

## Лабораторная работа 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ОГНЕУПОРОВ

#### 2.1. Цель работы

Освоить методику определения термостойкости огнеупорных материалов.

#### 2.2. Методические указания к самостоятельной работе

В кладке печей огнеупоры часто подвергаются действию переменных температур, особенно в печах с периодическим режимом работы, где разница температур часто достигает очень больших значений. Подобные колебания температуры в печах вызывают изменения структуры огнеупоров, приводящие к разрушению футеровки печей.

*Термостойкостью* называется способность огнеупорных изделий выдерживать резкие колебания температуры, не растрескиваясь и не разрушаясь. Термическая стойкость огнеупоров зависит от их природы и определяется физико-механическими свойствами материалов – модулем упругости, теплопроводностью, теплоемкостью и плотностью.

Эти факторы определяют скорость распространения температуры и быстроту ее выравнивания в огнеупоре, а следовательно, величину межкристаллических напряжений.

При внезапном нагревании в огнеупоре появляются значительные напряжения  $q$ . Это объясняется тем, что при плохой теплопроводности и значительной теплоемкости огнеупора его прогрев протекает весьма медленно. Поэтому напряжения, возникшие на границах двух разнотемпературных слоев, являются причиной механического разрушения огнеупора. Из рис. 1 видно, что нагреваемая сторона огнеупора расширяется, а холодная стремится сохранить свое первоначальное состояние.

Термостойкость огнеупорных изделий проверяют следующим способом. Испытуемые образцы огнеупоров предварительно взвешивают, а затем торцевыми концами помещают в печь на глубину 50 мм, остальная часть изделия находится вне печи; образцы нагревают до  $850^{\circ}\text{C}$  и выдерживают при данной температуре 40 мин. После этого их извлекают из печи и немедленно горячими концами ставят на торец

в бак с проточной водой на глубину 50 мм. В воде образцы выдерживают 3 мин, затем извлекают и устанавливают на холодные противоположные торцы на стол для воздушной отпарки на 7 мин. Такой цикл, состоящий из трех операций, называется водяной теплосменой. После каждой теплосмены образец взвешивают. Испытания продолжают до потерь образцом 20% от первоначальной массы. После этого испытания заканчивают; число водяных теплосмен, вызвавших разрушение изделия и потерю массы, равную 20%, характеризует его термостойкость в водяных теплосменах (табл. 1).

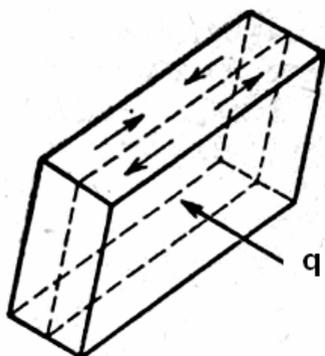


Рис. 1. Схема возникновения напряжений в огнеупоре при нагревании

Таблица 1

Термическая устойчивость огнеупорных изделий  
в водяных теплосменах

Название огнеупора	Число водяных теплосмен
Динасовые	1–3
Полукислые	4–15
Шамотные	10–25
Многошамотные	40–70
Шамотный огнеупорный легковес	7–12
Хромитовые	3–5
Хромомагnezитовые	5–12
Термостойкий хромомагnezит	40–60
Высокоплотные магнезитовые	10–16
Магнезитовые	2–5

Название огнеупора	Число водяных теплосмен
Карборундовые на глинистой связке	25–60
Цирконовые	10–17

Некоторые огнеупорные изделия, например легковесные и магнезитовые, подвергают испытаниям на термостойкость в воздушных теплосменах. В этом случае кирпичи закладывают в подвижную раму и подвергают одностороннему нагреву в стене печи и искусственному охлаждению дутьем. Вначале рама с кирпичом служит стеной печи, нагреваемой до 1500–1600° С, а затем ее передвигают для охлаждения к вентилятору. После ряда таких нагревов и охлаждений термическую стойкость испытанных изделий оценивают по суммарной потере их массы.

### **2.3. Порядок выполнения работы**

1. С помощью весов определить массу образцов, полученных у преподавателя.
2. Поместить образец в нагретую до 850° С печь и выдержать в печи 40 минут.
3. Извлечь образцы из печи, поместить на 3 минуты в емкость с водой.
4. Извлечь образцы из емкости с водой и выдержать на воздухе 7 минут.
5. Определить вес образца и рассчитать потерю его массы.
6. Повторить пункты 2–5 до 20% потери массы образцов.

### **2.4. Материалы, приборы и инструменты**

Работа по определению термостойкости огнеупоров выполняется с использованием образцов следующих огнеупоров: шамот, магнезит, хромомagneзит, динас. Для определения нагрева образцов до заданной температуры используется термическая печь сопротивления ТК-27.1250.Н.1Ф с силовым блоком и регулятором температуры. Исходная масса, промежуточные значения массы и потеря массы образцов измеряются с помощью весов ВЭУ-2-0,5/1.

### **2.5. Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Краткое изложение методики исследования термостойкости огнеупорных материалов.

4. Исходная масса, промежуточные значения массы и потеря массы образцов, представленные в виде таблицы.
5. График зависимости потери массы образцов от числа водяных теплосмен.
6. Сравнительные данные термостойкости образцов других подгрупп.
7. Выводы.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Что называется термостойкостью огнеупорных материалов?
2. От чего зависит и чем определяется термостойкость огнеупорных материалов?
3. Как определяется термостойкость огнеупоров в водяных теплосменах?
4. Как определяется термостойкость в воздушных теплосменах?
5. Для каких огнеупорных материалов применяются испытания термостойкости в водяных теплосменах?

## Лабораторная работа 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ОГНЕУПОРОВ

#### 3.1. Цель работы

Освоить методику определения теплоемкости огнеупорных материалов.

#### 3.2. Методические указания к самостоятельной работе

Энтальпия  $Q$  является функцией состояния и при изобарическом процессе равна количеству теплоты, необходимому для повышения температуры тела массой  $m$  от абсолютного нуля на величину  $T$ . Величину  $Q$  можно в этом случае принять пропорциональной температуре  $T$  и массе тела  $m$

$$Q = \bar{c} m T, \quad (8)$$

где  $\bar{c}$  – средний для взятого интервала температуры коэффициент пропорциональности, равный количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 г вещества на 1 К. Этот коэффициент пропорциональности называется удельной теплоемкостью. При нагревании тела массой  $m$  от  $T_1$  до  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ ) его энтальпия увеличивается от  $Q_1$  до  $Q_2$ . Из определения теплоемкости:

$$\bar{c}_p = \frac{Q_2 - Q_1}{T_2 - T_1} \frac{1}{m}. \quad (9)$$

Эта величина средней теплоемкости обычно определяется калориметрическим методом. Уменьшая разницу  $T_2 - T_1$  до бесконечно малой величины, получим истинную теплоемкость  $c_p$  при определенной температуре, дифференциальное выражение которой

$$c_p = \frac{dQ}{dT} \frac{1}{m}. \quad (10)$$

Величина  $c_p$  называется удельной теплоемкостью и измеряется в Дж/(г·К).

Из теории теплоемкости газов известно, что для каждого вещества имеются две характерные величины удельной теплоемкости –  $c_p$  и  $c_v$ , т. е. теплоемкость при постоянном давлении и постоянном объеме, причем  $c_p > c_v$ . Практически измерить  $c_v$  не удастся. Поэтому в дальнейшем, когда речь идет о теплоемкости, полученной из эксперимента,

имеется в виду теплоемкость при постоянном давлении  $c_p$ . В тех случаях, когда величина давления  $p$  не оговорена, можно принимать  $p = 0$ , так как при многочисленных определениях теплоемкости металлов в вакууме и при атмосферном давлении заметной разницы обнаружено не было.

При определении требуемого количества тепла на нагревание огнеупорной кладки печи надо знать величину теплоемкости огнеупоров. Теплоемкость огнеупоров имеет большое значение при расчете насадки теплообменных аппаратов, типа регенераторов и кауперов, а также при определении расхода тепла периодически работающих печей. Теплоемкость различных огнеупоров определяется их природой и зависит от температуры.

Зависимость теплоемкости огнеупорных изделий от химического состава и температуры показана в табл. 2.

Таблица 2

Теплоемкость огнеупоров при различных температурах

№ п/п	Огнеупоры (кирпич)	Химический состав огнеупоров, %	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость кДж/(кг·К), при температуре, К			
				473	873	1273	1473
1.	Шамотный	40 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 57SiO <sub>2</sub>	1800	0,94	1,34	1,25	1,28
2.	Полукислый шамотный	30 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 63SiO <sub>2</sub>	1830	0,88	1,143	1,24	1,26
3.	Динас	96SiO <sub>2</sub>	2040	0,99	1,18	1,21	1,22
4.	Магнезитовый	88,85 MgO, 9,31Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2350	1,06	1,22	1,26	1,42
5.	Угольные электроды	C	1480-1650	1,97	—	—	—
6.	Графитированные изделия	C	1500-1700	1,36	—	—	—

Определить удельную теплоемкость огнеупорного материала можно, используя калориметр смешения. В таких калориметрах сосуд, заполненный калориметрической жидкостью, хорошо теплоизолирован от внешней среды. Калориметрическая жидкость должна иметь низкое давление пара в температурном интервале измерений, быть химически инертной и легко смешиваться с исследуемыми веществами. Для измерений при температурах, близких к комнатной, этим требованиям удовлетворяет вода; кроме того, ее удельная теплоемкость в интервале от 0 до

100° С известна с точностью до 0,001%. Определение удельной теплоемкости веществ с помощью калориметра смешения проводят следующим образом. Образец с температурой  $T_1$  вводят в калориметрическую жидкость с температурой  $T_0$ . По достижении температурного равновесия калориметрическая жидкость приобретает температуру  $T_{CM}$ .

Уравнение баланса теплообмена можно записать следующим образом:

$$C_1 m_1 (T_1 - T_{CM}) = C_K (T_{CM} - T_0), \quad (11)$$

где  $C_1, C_2$  — удельная теплоемкость образца и калориметрической жидкости соответственно;  $m_1, m_2$  — масса образца и калориметрической жидкости соответственно.

Однако такой баланс справедлив лишь для идеального варианта проведения опыта, когда вся теплота, выделенная образцом, без потерь идет на нагревание калориметрической жидкости. В действительности из-за тепловых потерь на нагревание калориметрического сосуда и других деталей калориметра только часть этой теплоты расходуется на повышение температуры калориметрической жидкости. Тогда

$$C_1 m_1 (T_1 - T_{CM}) = C_K (T_{CM} - T_0), \quad (12)$$

где  $C_K$  — теплоемкость калориметрической системы, которую определяют градуировкой.

### 3.3. Порядок выполнения работы

1. С помощью весов определить массу образцов, полученных у преподавателя.
2. Измерить начальную температуру калориметрической жидкости.
3. Поместить образец в нагретый до 300° С шкаф и выдержать там в течение 30 минут.
4. Извлечь образцы из шкафа и поместить в калориметр.
5. Определить температуру калориметрической жидкости.
6. Рассчитать теплоемкость огнеупорного материала.

### 3.4. Материалы, приборы и инструменты

Работа по определению теплоемкости огнеупоров выполняется с использованием калориметра смешения. Базовой частью конструкции установки является калориметр (рис. 2), который состоит из крышки (1) — детали, необходимой для разграничения сред (в полости

крышки по всему диаметру проложен пенопласт), и калориметрического сосуда – вакуумированной двустенной колбы, имеющей наружную (2) и внутреннюю (3) стенки из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. В крышку калориметра вмонтированы датчик измерения температуры термосопротивление ТСМ-50М (4) и двигатель (7) с мешалкой (5) для перемешивания рабочей жидкости, отверстие с заглушкой (6), фиксатор (8). Управление работой калориметра осуществляется блоком управления (рис. 3), включающим вторичный прибор для измерения температуры ТРМ-200, трансформатор и выпрямитель для работы двигателя мешалки.

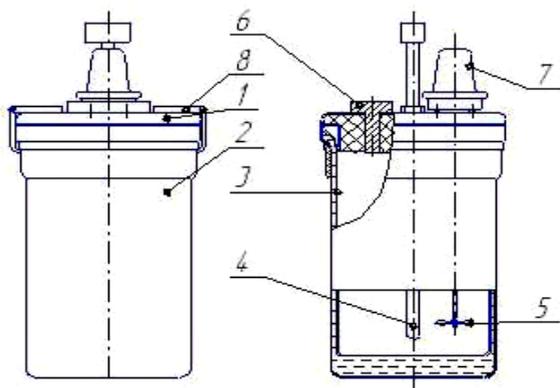


Рис. 2. Схема калориметра смешения

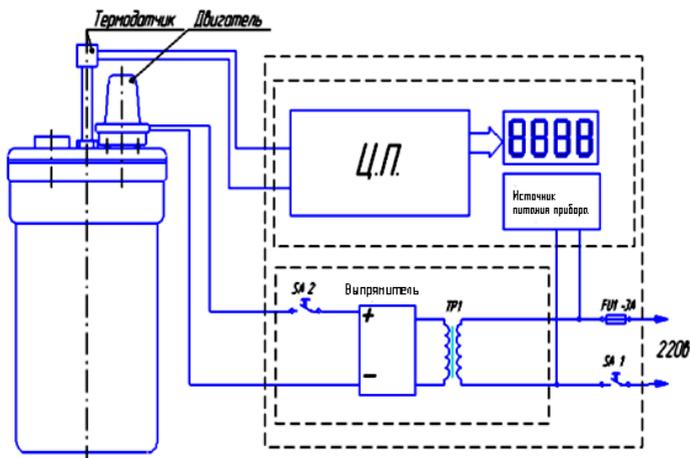


Рис. 3. Принципиальная схема блока управления калориметра

Масса образцов измеряется с помощью весов ВЭУ-2-0,5/1. Нагрев и выдержка проводятся в нагревательном шкафу Heraeus UT 6060.

### **3.5. Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Краткое изложение методики исследования теплоемкости огнеупорных материалов.
4. Масса образца, температура образца, начальная и конечная температура калориметрической жидкости и теплоемкость огнеупора, представленные в виде таблицы.
5. Сравнительные данные теплоемкости образцов других подгрупп.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Что называется удельной теплоемкостью вещества?
2. Как определяется средняя теплоемкость вещества?
3. В каких случаях необходимо учитывать теплоемкость огнеупорных материалов?
4. Каков принцип действия калориметра смешения?

## Лабораторная работа 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОГНЕУПОРОВ

#### 4.1. Цель работы

Освоить методику определения теплопроводности огнеупорных материалов.

#### 4.2. Методические указания к самостоятельной работе

Теплопроводность  $\lambda$  с математической точки зрения представляет собой коэффициент пропорциональности, чья роль заключается в уравнивании размерностей левой и правой частей закона Фурье, и измеряется в Вт/(м·К).

С физической точки зрения теплопроводность – теплофизическая характеристика вещества. Для различных веществ при одинаковых градиентах температуры, поверхностях  $F$  и времени  $\tau$  количество проходящей через тело теплоты определяется только  $\lambda$ . Чем больше теплопроводность, тем выше будет способность вещества проводить теплоту, и наоборот. Иначе говоря, теплопроводность должна представлять собой теплофизический параметр, определяющий способность тел проводить теплоту.

Для одного и того же материала теплопроводность изменяется в довольно широком диапазоне, причем характер изменения определяется многими факторами: температурой, количеством примесей, наличием влаги, давлением и т. п. Как правило, зависимость от вышеперечисленных факторов не поддается строгому аналитическому описанию, поэтому основным источником получения достоверных значений теплопроводности остается эксперимент.

Большинство методов определения коэффициентов теплопроводности материалов основано на стационарном режиме – это метод плиты, метод трубы и метод шара.

Здесь будет рассмотрен только метод плиты, который основан на законе теплопроводности плоской стенки неограниченных размеров.

Принципиальная схема прибора представлена на рис. 4. В средней части прибора расположен плоский электрический нагреватель 1, над ним испытуемый образец 2 и холодильник 3. С целью компенсации

утечки тепла снизу и с боков устанавливаются дополнительные электрические нагреватели 4, 5. От потерь тепла во внешнюю среду прибор тщательно изолирован теплоизоляционным материалом 6, 7. При установившемся тепловом состоянии системы все тепло, выделяющееся в основном нагревателе 1, пройдет через образец и поглотится холодильником. Если количество выделившегося тепла равно  $Q$  и температуры  $t_1$  и  $t_2$  известны, то коэффициент теплопроводности определяется из следующего соотношения:

$$\lambda = \frac{Q\delta}{F(t_1 - t_2)} = \frac{0,86I\Delta E\delta}{F(t_1 - t_2)}. \quad (13)$$

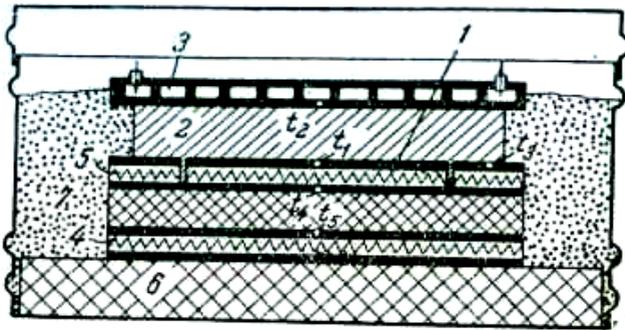


Рис. 4. Схема прибора для определения теплопроводности изоляционных и строительных материалов по методу плиты

Замеры  $Q$  ( $I$  и  $\Delta E$ ),  $t_1$  и  $t_2$  следует производить лишь после того, как температура  $t_3$  будет равна  $t_1$  и температура  $t_4$  равна  $t_5$ . Только в этом случае все тепло, выделившееся в центральном нагревателе 1, действительно пройдет через испытуемый образец 2.

Огнеупорные изделия используются при сооружении печей в качестве строительного материала. Кроме того, во время плавки руд или металлов огнеупорная футеровка изолирует рабочий объем печей от окружающей среды и препятствует распространению тепла за пределы печи, так как большинство огнеупоров обладают низкой теплопроводностью (табл. 3).

В некоторых металлургических процессах огнеупоры должны являться посредниками при переносе тепла через стенку к нагреваемому материалу.

Например, в плавильных или нагревательных печах, во вращающихся трубчатых, в индукционных или электродуговых печах с уменьшением теплопроводности огнеупоров значительно понижаются потери тепла в окружающую среду. В других случаях, например во всех муфельных печах, в ретортных при получении цинка или магния, при плавке алюминия и его сплавов в тигельных печах, с уменьшением теплопроводности материала стенки значительно ухудшаются условия нагрева металла и повышается расход тепловой энергии на единицу металла.

Таблица 3

Коэффициенты теплопроводности огнеупоров

Наименование огнеупоров	Температурный коэффициент теплопроводности, Вт/(м К)	Коэффициент теплопроводности при рабочей температуре, Вт/м	Рабочая температура, К
Шамотный кирпич	$(0,72+0,0005t)1,16$	1,65	1620–1720
Пеношамотный кирпич	$(0,24+0,0002t)1,16$	0,59	1620
Кирпич из легковесного шамота	$(0,09+0,000125t)1,16$	0,29	1570
Динасовый кирпич	$(0,8+0,0006t)1,16$	2,11	1970
Магнезитовый кирпич	$(4,0-0,0015t) 1,16$	0,75	1920–1970
Хромомагнезитовый кирпич	$(1,6-1,7t) 1,16$	1,966	1970
Хромитовый кирпич	$(1,1-0,00035t) 1,16$	0,309	1920–1970
Диатомитовый кирпич	$(0,097-0,0002t) 1,16$	1,299	1120
Муллитовые изделия	$(1,45-0,0002t) 1,16$	5,24	1920
Корундовые изделия	$(1,8+0,0016t) 1,16$	5,24	1920–1970
Цирконовые изделия	$(1,12+0,00055t) 1,16$	2,447	2020–2070
Карбофраксные изделия	$(18-0,009t) 1,16$	15,66	1670–1770
Угольные изделия	$(20-0,030t) 1,16$	16,24	2270
Графитовые изделия	$(140-0,035t) 1,16$	81,20	2270
Изоляционные материалы из распушенного асбеста	$(0,112+0,00016t) 1,16$	0,2598	700
Изоляционные материалы из диатомита	$(0,062+0,000225t) 1,16$	0,280	90–1100
Изоляционные материалы из шлаковой ваты	$(0,05+0,000125t) 1,16$	0,167	750

Следовательно, к теплопроводности огнеупоров в зависимости от условий их службы могут быть предъявлены разные требования.

В большинстве случаев огнеупоры служат в качестве изоляторов при движении тепла от рабочего объема печи во внешнюю среду, в этом случае огнеупоры должны обладать минимальной теплопроводностью. Теплопроводность огнеупоров определяется их химико-минералогическим составом и структурой. Большинство огнеупоров относятся к плохим проводникам тепла. Исключение составляют углеродные изделия – угольные, графитовые и карборундовые – и в некоторой степени магнезитовые.

### 4.3. Порядок выполнения работы

1. С помощью штангенциркуля определите толщину образцов, полученных у преподавателя.

2. Определите плотность теплового потока от источника нагрева приспособления для контроля теплопроводности огнеупоров, контролируя температуру пластины из сплава АК12. Для расчета плотности теплового потока можно воспользоваться формулой:

$$q = \lambda_{А1} \frac{(T_1 - T_2)}{\delta_{А1}}, \quad (14)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности сплава АК12, равный 150 Вт/м К;  $T_1$  – температура внутренней поверхности пластины;  $T_2$  – температура наружной поверхности пластины;  $\delta_{А1}$  – толщина пластины из сплава АК12.

3. Установите образец огнеупора на установку и включите источник нагрева.

4. Выдержите образец на установке до установления стационарного теплового состояния.

5. Зафиксируйте температуру поверхностей образца.

6. Рассчитайте теплопроводность огнеупорного материала по формуле

$$\lambda_o = \frac{q\delta_o}{(T_3 - T_4)}, \quad (15)$$

где  $\lambda_o$  – коэффициент теплопроводности огнеупорного материала;  $\delta_o$  – толщина огнеупорного материала;  $T_3$  – температура внутренней поверхности огнеупора;  $T_4$  – температура наружной поверхности огнеупора.

#### 4.4. Материалы, приборы и инструменты

Работа по определению теплопроводности огнеупоров выполняется с использованием специальной установки (рис. 5). Установка состоит из источника питания 1, нагревательного элемента 6, токоподводов 4. Нагревательный элемент расположен в форме 5, состоящей из стальной опоки 2, заформованной огнеупорным цементом 3. Сверху формы устанавливается образец из испытуемого материала 7. Сверху и снизу образца для измерения температуры установлены ХА термодпары 9, соединенные с измерителем 8 – регулятором ТРМ 1.

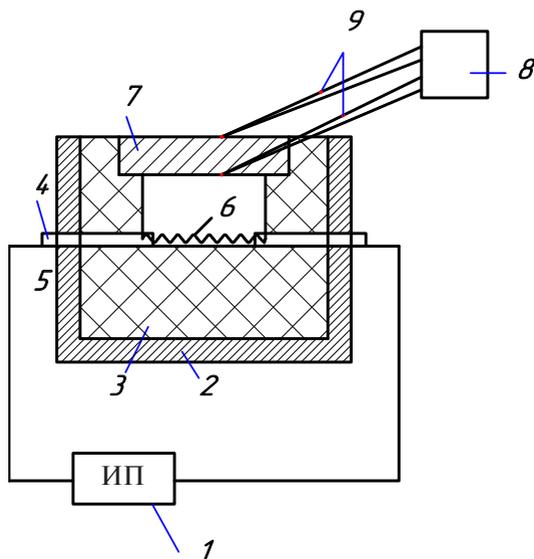


Рис. 5. Схема экспериментальной установки

#### 4.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Краткое изложение методики исследования теплопроводности огнеупорных материалов.
4. Схема экспериментального приспособления.
5. Температура поверхностей образца, величина удельного теплового потока и теплопроводность огнеупора, представленные в виде таблицы.

6. Сравнительные данные коэффициентов теплопроводности образцов других подгрупп.
7. Выводы.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Что называется теплопроводностью материалов?
2. Какие методы применяются для определения коэффициента теплопроводности материалов?
3. В чем сущность метода плиты?
4. Покажите схему прибора для определения коэффициента теплопроводности материалов.
5. Какие требования по теплопроводности предъявляются к огнеупорам?

## Библиографический список

1. Арутюнов, В.А. *Металлургическая теплотехника : учеб. для студентов металлургических специальностей вузов* / В.А. Арутюнов, В.И. Миткалинный, С.Б. Старк ; под ред. М.А. Глинкова. – М. : *Металлургия*, 1974. – 672 с.
2. Кашеев, И.Д. *Свойства и применение огнеупоров : справочник* / И.Д. Кашеев. – М. : *Теплотехник*, 2004. – 352 с.
3. *Технология керамики и огнеупоров* / П.П. Будников [и др.]. – М. : *Стройиздат*, 1962. – 707 с.
4. Черепанов, А.М. *Высокоогнеупорные материалы и изделия из окислов* / А.М. Черепанов, С.Т. Тресвятский. – М. : *Металлургия*, 1964. – 400 с.

**Пример оформления титульного листа к отчету**

ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АВТОМЕХАНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
КАФЕДРА «ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ СВАРОЧНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА И ПАЙКИ»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

Исследование пористости огнеупорных материалов

Группа \_\_\_\_\_

Выполнил студент \_\_\_\_\_

Проверил преподаватель \_\_\_\_\_

Тольятти 2011

### **Требования к оформлению отчета о лабораторной работе**

Отчет о лабораторной работе оформляется в рукописном или печатном виде индивидуально каждым студентом, выполнившим необходимые эксперименты (независимо от того, выполнялся ли эксперимент индивидуально или в составе группы студентов). Текст пишется ручкой на писчей бумаге одного формата с интервалом между строками, удобным для чтения, с оставлением боковых полей для возможных заметок и исправлений. Страницы отчета следует пронумеровать (титульный лист не нумеруется, далее идет страница 2 и т. д.). В печатном виде текст отчета набирается шрифтом Times New Roman размером 14 пунктов, с полуторным междустрочным интервалом.

Вторая страница текста, следующая за титульным листом, должна начинаться с *формулировки цели работы*.

Отчет должен содержать следующие основные разделы:

1. Программа работы.
2. Методика эксперимента.
3. Результаты и их обсуждение.
4. Выводы.

В случае необходимости в конце отчёта приводится перечень литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа 1. Исследование пористости огнеупорных материалов.....	4
Лабораторная работа 2. Исследование термической стойкости огнеупоров.....	8
Лабораторная работа 3. Исследование теплоемкости огнеупоров.....	12
Лабораторная работа 4. Исследование теплопроводности огнеупоров.....	17
Библиографический список.....	23
Приложения.....	24

Учебное издание

*Ковтунов Александр Иванович*  
*Семистенов Денис Александрович*  
*Чермашенцева Татьяна Владимировна*

## СВОЙСТВА ОГНЕУПОРОВ

Лабораторный практикум

Редактор *Т.Д. Савенкова*  
Технический редактор *Э.М. Малявина*  
Вёрстка: *Л.В. Сызганцева*  
Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 02.02.2011. Формат 60×84/16.  
Печать оперативная. Усл. п. л. 1,7. Уч.-изд. л. 1,6.  
Тираж 50 экз. Заказ № 1-106-10.

Тольяттинский государственный университет  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14