

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением»

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Лабораторные работы (практикум)
для студентов специальностей
1-36 01 05 «Машины и технология обработки
материалов давлением»
и 1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении»

Минск
БНТУ
2014

УДК 669.04(076.5)(075.8)

ББК 34.316я7

М54

Составители:

Л. М. Давидович, М. В. Логачёв, Н. И. Иваницкий

Рецензенты:

А. Н. Крутилин, А. П. Ласковнев

М54 **Металлургическая** теплотехника : лабораторные работы (практикум) для студентов специальностей 1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов давлением» и специальности 1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении» / сост.: Л. М. Давидович, М. В. Логачёв, Н. И. Иваницкий. – Минск : БНТУ, 2014. – 58 с.
ISBN 978-985-550-086-6.

Лабораторный практикум предназначен для студентов машиностроительных специальностей вузов, изучающих дисциплину «Металлургическая теплотехника» (специальности 1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов давлением» и 1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении»).

Приведены рекомендации по выполнению лабораторных работ, методики расчета коэффициентов теплоотдачи при охлаждении металлов, описаны устройства и принцип работы приборов для измерения высоких температур.

УДК 669.04(076.5)(075.8)

ББК 34.316я7

ISBN 978-985-550-086-6

© Белорусский национальный
технический университет, 2014

Лабораторная работа № 1

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Цель работы: ознакомление с устройством пирометров и их характеристиками.

Теоретические сведения

Для измерения высоких температур используют: термоэлектрические, оптические, радиационные, фотоэлектрические пирометры и др. Наиболее широкое применение получили термоэлектрические пирометры (термопары), обладающие рядом преимуществ:

1. Они дают более точное измерение высоких температур;
2. Их показания можно передавать на большие расстояния;
3. Показания можно автоматически записывать.

Технические термопары позволяют измерять температуры в интервале от -50 до $+1800$ °С. Принцип действия термопар основан на изменении термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) термопары от температуры.

Термопара состоит из двух разнородных проводников, так называемых термоэлектродов, сваренных с одной стороны. Место сварки с прилегающими к нему концами термоэлектродов называется *рабочим концом термопары*. Рабочий конец термопары погружается в среду, температура которой измеряется. Вторые (несваренные) концы проводников являются «свободными концами». К ним подсоединяются провода от прибора, измеряющего термоЭДС термопары. Если температура концов различна, то в термопаре возникает термоЭДС, которая зависит от материала и температур рабочего и свободного концов термоэлектродов. Если термоэлектроды однородны, то термоЭДС термопары не зависит от распределения температуры вдоль них.

При измерениях температуру свободных концов термопары наиболее удобно поддерживать равной нулю, однако практически это не всегда возможно. Обычно чем выше температура свободных концов, тем меньше термоЭДС термопары. При этом предполагается, что температура обоих свободных концов одинакова. При эксплуатации термопар на последнее обстоятельство необходимо обращать особое внимание. Для поддержания равенства температур обоих свободных концов они термостатируются.

ТермоЭДС, развиваемая термопарой, температура свободных концов которой не равна 0 °С, определяется из уравнения

$$e_t = e_0 - e,$$

где e_t – термоЭДС термопары при температуре свободных концов t , °С;

e_0 – термоЭДС термопары при температуре свободных концов 0 °С;

e – термоЭДС при температуре рабочего конца t , °С, а свободных 0 °С.

На практике во избежание дополнительных ошибок, возникающих вследствие отклонения температуры свободных концов от нуля, во многих автоматических и самопишущих приборах применяют специальные автоматические компенсирующие схемы.

Термопары классифицируются по следующим признакам:

по роду материала термоэлектродов;

глубине (длине) погружаемой части в контролируемую среду;

инерционности.

Согласно нормативным документам инерционность термопар представляет собой время, прошедшее с момента погружения термопары, находившейся при комнатной температуре, в кипящую воду до момента, начиная с которого разность температур кипящей воды и рабочего конца термопары не превышает 1 % полного интервала изменения температуры. По степени инерционности термопары делятся на три группы:

БИ – с большой инерционностью (время 2,5–8 мин);

ОИ – с обыкновенной инерционностью (время 2,5 мин);

МИ – с малой инерционностью (время 0–1,5 мин).

Промышленность выпускает термопары следующих стандартных градуировок: ПП (платинородий-платина), ПР (платинородий-платинородий), ХА (хромель-алюмель), ХК (хромель-копель), НК-СА (сплав НК – Ni + 17 % Co + 2 % Al + 2 % Mn + 1 % Si, сплав СА – Ni + 3,5 % Al + 1,5 % Mn + 1 % Si), ЖК (железо-копель), МК (медь-копель). Наиболее широкое применение получили термопары градуировок ПП, ПР30/6, ХА и ХК.

Термопара ПП (платинородий-платина) относится к группе термопар из благородных металлов. Положительным электродом служит платинородий (90 % Pt + 10 % Rh), отрицательным – платина высокой степени чистоты. Максимальная температура термопары ПП при кратковременном применении равна 1600 °С, однако рабочая температура (длительное применение) значительно ниже и равна 1300 °С. Это объясняется тем, что защитные оболочки термопар не выдерживают высоких температур, а также способностью электродов (особенно платины) при высоких температурах поглощать пары металла.

Термопара ПП чувствительна к восстановительным средам и имеет малую величину термоЭДС по сравнению с другими термопарами. Так, например, в восстановительной атмосфере печи в присутствии кремнезема SiO₂ термопара, поглотив восстановленный кремний, выходит из строя при 1000–1100 °С. Величина термоЭДС при температуре рабочего конца термопары 100 °С и температуре свободных концов 0 °С $e_{100} = 0,6$ мВ.

Преимуществами термопары ПП являются высокая стойкость к химическим воздействиям даже при высоких температурах, хорошая воспроизводимость и малые отклонения термоЭДС различных термопар этой градуировки от номинала, установленного стандартом.

Термопара ПР30/6 (платинородий-платинородий) относится к группе термопар из благородных металлов. Положительным электродом является проволока, изготовленная из сплава: 30 % родия и 70 % платины, отрицательным – электрод из проволоки, изготовленной из сплава: 6 % родия и 94 % платины. Термопара позволяет измерять температуры в интервале от 0 до 1800 °С. Рабочая температура равна 1600 °С. ТермоЭДС при температуре рабочего конца термопары 100 °С и температуре свободных концов 0 °С $e_{100} = 0,051$ мВ.

Термопара ХА (хромель-алюмель) относится к группе термопар из неблагородных металлов. Положительным электродом является хромель – сплав из группы нихромов (89 % Ni + 10 % Cr + 1 % Fe), отрицательным электродом – алюмель (95 % Ni + 2 % Al + 1 % Si + 2 % Mn). Максимальная температура при кратковременном применении равна 1300 °С, рабочая температура ниже и равна 1100 °С. Термопары ХА лучше работают в окислительной атмосфере, чем в восстановительной.

Величина термоЭДС при температуре рабочего конца термопары 100 °С и температуре свободных концов 0 °С $e_{100} = 4,1$ мВ.

Термопара ХК (хромель-копель) относится к группе термопар из неблагородных металлов. Положительным электродом служит хромель, отрицательным – копель (56 % Cu + 44 % Ni). Максимальная температура при кратковременном применении равна 800 °С, рабочая температура (длительное применение) равна 600 °С. Максимальная температура ограничивается свойствами копеля, легко окисляющегося при температуре порядка 800 °С.

Величина термоЭДС при температуре рабочего конца термопары 100 °С и температуре свободных концов 0 °С $e_{100} = 6,95$ мВ.

Таким образом, основным достоинством термопар из неблагородных металлов (ХА, ХК) является то, что они дают значительно большую термоЭДС, однако их градуировка менее стабильна, а максимально допустимая температура замера ниже, чем у термопар из благородных металлов.

Термопары обычно выпускаются с термоэлектродами длиной не более 2–3 м. Однако на практике измерительный прибор часто приходится устанавливать на значительном расстоянии от термопары, чтобы обеспечить постоянство температуры ее свободных концов. В таких случаях применяют компенсационные (удлинительные) провода.

К каждому свободному концу термопары подключают соответствующий компенсационный провод. Оба компенсационных провода подбирают так, чтобы составленная из них термопара при температуре рабочих концов 100 °С и свободных концов 0 °С развивала термоЭДС, близкую к термоЭДС термопары, с которой применяются данные компенсационные провода.

На рис. 1.1 представлено устройство технической термопары. Диаметр термоэлектродов из благородных металлов обычно 0,5 мм, а из хромеля, копеля и алюмеля – от 0,5 до 3,2 мм. Электроды на рабочем (горячем) конце скручивают и сваривают электрической дугой. Спай 1 и скрутку размещают в фарфоровом наконечнике 2. Выше скрутки их изолируют друг от друга фарфоровыми бусами 3. Для защиты электродов от механических повреждений и химического воздействия измеряемой среды их размещают внутри стальной трубки 4 (чехла, кожуха). Сверху чехла находится головка термопары 5 с клеммами 6 и крышкой 7.

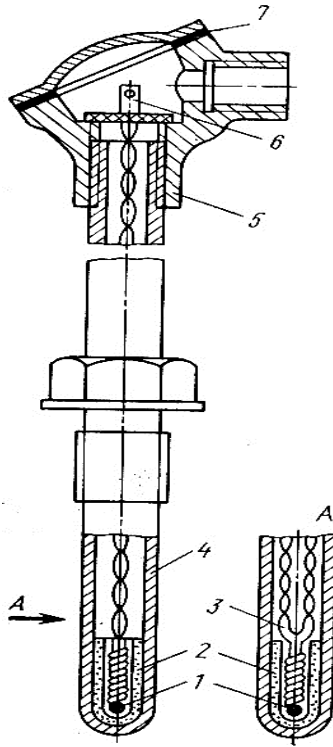


Рис. 1.1. Устройство технической термопары

Измерение температуры бесконтактным методом можно осуществлять с помощью оптических пирометров на основе использования зависимости яркости или энергии излучения нагретого тела от температуры.

Принцип работы оптического пирометра излучения (рис. 1.2) основан на сравнении яркости излучения нагретого тела и нити электрической лампы 3 при длине волны 0,65 мкм, пропускаемой красным светофильтром 5. Объектив 1 и окуляр 4 прибора для визирования на тело выполнены подвижными. Лампа питается батареей 7, напряжение которой изменяется реостатом 8 и измеряется милливольтметром 6, шкала которого градуирована в градусах международной сторадусной шкалы. Пирометры имеют две шкалы: одна с

пределами измерения 800–1400 °С, а вторая 1200–2000 °С. При использовании прибора для измерения температур выше 1400 °С на пути лучей помещают дополнительный ослабляющий светофильтр 2. Измерение температур начинают с визирования прибора на нагретое тело, а затем с помощью реостата изменяют яркость нагрева нити до тех пор, пока верхняя часть нити не исчезнет на фоне нагретого изделия. Если температура нити выше температуры тела, то нить будет ярче фона, создаваемого телом. При подогреве нити она будет темнее фона тела, т. е. ее температура ниже температуры изделия.

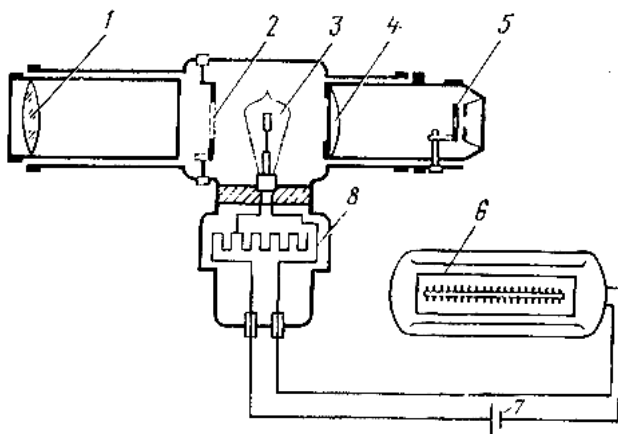


Рис. 1.2. Оптический пирометр

Погрешность измерения температур поверхности стальных изделий при 1200 °С составляет ± 20 °С, и ее величина зависит от степени черноты тела и ослабления излучения в поглощающей промежуточной среде, например в продуктах сгорания.

Измерения температур от 400 до 2500 °С также проводят радиационными пирометрами, которые регистрируют лучистые потоки в интервале длин волн 0,4–2,5 мкм (рис. 1.3). Лучистый тепловой поток от нагретого тела 1 концентрируется линзой в пирометре 2 на чувствительном элементе 3. Нагрев элемента сопровождается возникновением термоЭДС, которая регистрируется автоматическим потенциометром 4. Этот прибор широко используют в схемах автоматического регулирования.

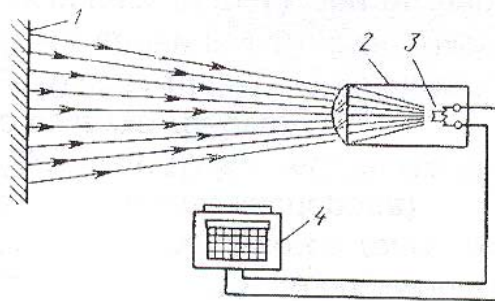


Рис. 1.3. Радиационный пирометр

Помимо этих приборов промышленность выпускает также фотоэлектрические и цветковые пирометры, обладающие повышенной точностью измерения температур.

Инфракрасный пирометр предназначен для бесконтактного измерения температуры поверхности и применяется для контроля теплового режима оборудования, а также для измерения в технологических процессах металлургии, машиностроения и т. д.

Пирометр «Кельвин Б1» преобразует энергию инфракрасного излучения, излучаемую поверхностью объекта, в электрический сигнал. Затем эта информация преобразуется в температурные данные. Схема измерения температуры объекта инфракрасным бесконтактным пирометром «Кельвин Б1» представлена на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Схема измерения температуры пирометром «Кельвин Б1»

В «Кельвине Б1» предусмотрена автоматическая компенсация температуры окружающей среды. Цифровая установка излучательной способности объектов по справочной таблице (табл. 1.1) обеспечивает необходимую точность измерений.

Таблица 1.1

Излучательные способности материалов

Материал	Температура, °С	Коэффициент теплового излучения
Алюминий:	220–520	0,008–0,062
– сильно окисленный	87–520	0,02–0,33
– фольга	100–30	0,04–0,03
Медь:	200–300	0,022–0,024
	500–800	0,05–0,061
– окисленная	30–330	0,38–0,47
	520–820	0,59–0,87
– окисленная, при нагреве	200–600	0,57–0,55
Нихромовая проволока:		
– чистая	50	0,65
– чистая, при нагреве	500–1 000	0,71–0,79
– окисленная	50–500	0,95–0,98
Сталь углеродистая:	70–1 130	0,06–0,31
– прокатанная	50	0,56
– шлифованная	940–1 100	0,52–0,61
– с шероховатой поверхностью	50	0,95–0,98
– ржавая, красная	20	0,59
– оцинкованная	20	0,28
– легированная (8 % Ni; 18 % Cr)	500	0,35
Сталь нержавеющая:		
– полированная	25–30	0,13
– после пескоструйной обработки	700	0,70
– после прокатки	700	0,45
– окисленная	600	0,79
– окисленная, шероховатая	40–370	0,94–0,97

Материал	Температура, °С	Коэффициент теплового излучения
Титан полированный	500	0,20
	1000	0,36
	200	0,40
Титан окисленный	500	0,50
	1 000	0,60
Цинк:	30–260	0,02–0,06
– окисленный	30–200–530	0,28–0,14–0,11
Чугун:		
– обточенный	830–990	0,60–0,70
– окисленный при нагреве	200–600	0,64–0,78
– сильно окисленный, шероховатый	40–230	0,95
Чугунное литье	50	0,81
Чугун в болванках	1 000	0,95

Излучательной способностью объекта называется отношение мощности излучения объекта при данной температуре к мощности излучения абсолютно черного тела. Излучательная способность абсолютно черного тела равна единице. Излучательные свойства объекта определяются свойствами материала и чистотой обработки поверхности объекта. В табл. 1.1 приведены типичные значения широко распространенных материалов.

Материалы, инструмент, оборудование

1. Инфракрасный бесконтактный пирометр «Кельвин Б1», термомпара хромель-алюмель.
2. Нагревательная (муфельная) печь.
3. Нагреваемые образцы.
4. Кузнечные клещи.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с принципом действия инфракрасного бесконтактного пирометра «Кельвин Б1».

2. Нагреть муфельную печь до температуры 800 °С.
3. Поместить образцы в нагретую печь и нагревать их в течение 15 мин.
4. Подготовить пирометр «Кельвин Б1» к работе.
5. Извлечь нагретые образцы из печи и произвести замеры температуры пирометром и термопарой.
6. Данные измерений занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Данные измерений

Материал образца	Температура в печи, °С	Коэффициент теплового излучения	Время нагрева образца, мин	Температура поверхности образца, измеренная термопарой, °С	Температура поверхности образца, измеренная пирометром, °С

Лабораторная работа № 2

УСТАНОВЛЕНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИОМЕТРА

Цель работы: ознакомление с электронным автоматическим потенциометром и изучение его работы в комплекте с термопарой при измерении и автоматическом регулировании температуры.

Теоретические сведения

Электронные автоматические показывающие самопишущие и регулирующие потенциометры предназначены для непрерывного измерения, записи и регулирования температуры или других величин, значения которых могут быть преобразованы в напряжения постоянного тока.

Наиболее часто потенциометры работают в комплекте с термопарами, радиационными пирометрами или датчиками, являющимися источниками термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) или напряжения постоянного тока.

В основу работы потенциометров положен компенсационный метод измерения, состоящий в уравнивании измеряемого напряжения, т. е. неизвестной термоэлектродвижущей силы E_x , создаваемой термопарой или радиационным пирометром, известной разностью потенциалов, снимаемой с калиброванного реохорда.

Измерительной схемой потенциометров служит компенсационно-мостовая схема (рис. 2.1).

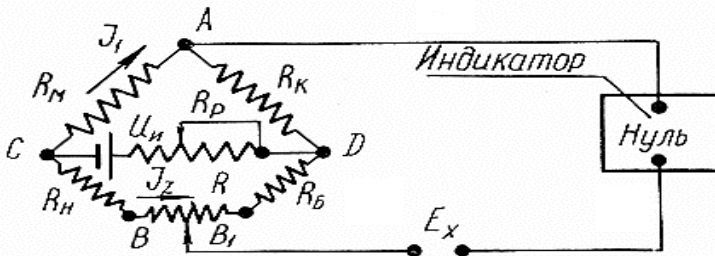


Рис. 2.1. Компенсационно-мостовая схема

Компенсационно-мостовая схема состоит из трех плеч с сопротивлениями R_n , R_m , R_k и из плеча, содержащего реохорд R и калиброванное сопротивление R_δ . К вершинам моста C и D последовательно с регулируемым сопротивлением R_p подключен источник питания U_n . Напряжение на других двух вершинах моста A и B зависит от положения движка на реохорде.

Для сравнения неизвестного напряжения E_x с напряжением на реохорде последовательно с E_x включен чувствительный нуль-индикатор. Если измеряемое напряжение E_x не равно напряжению в точках A и B моста, то перемещением движка реохорда можно найти положение равновесия схемы, т. е. отсутствие отклонения указателя нуль-индикатора. При другом значении неизвестного напряжения можно найти другое положение движка реохорда, при котором будет отсутствовать отклонение указателя индикатора.

Таким образом, положение движка реохорда определяет значение измеряемого напряжения.

В автоматических потенциометрах компенсация осуществляется с помощью электромеханической следящей системы: напряжение рассогласования между измеряемым напряжением E_x и компенсационной термоЭДС (падением напряжения на реохорде) используется в качестве управляющего сигнала для исполнительного механизма (реверсивного двигателя), перемещающего движок калиброванного реохорда. Роль нуль-индикатора в электронных автоматических потенциометрах выполняет электронный усилитель, управляющий работой реверсивного двигателя.

Автоматические потенциометры получили широкое распространение для измерения, регистрации, сигнализации и автоматического регулирования температуры в печах. На рис. 2.2 приведена упрощенная схема автоматического потенциометра. Сигнал (термоЭДС) термопары, равный $E(t_2, t_0)$, сравнивается с компенсирующим напряжением U_k , снимаемым с диагонали измерительного моста ИМ. При наличии дисбаланса в цепи появляется разность напряжений, которая с помощью вибропреобразователя ВП преобразуется в слабый пульсирующий переменный ток, который затем усиливается с помощью усилителей напряжения УН мощности и УМ. Усиленный сигнал подается на клеммы реверсивного двигателя РД. Направление вращения ротора двигателя зависит от знака дисбаланса, поэтому двигатель перемещает движок реохорда в ту или

иную сторону для компенсации напряжений, что характеризуется нулевым током на клеммах двигателя и его остановкой. С ротором двигателя связана стрелка указывающего прибора.

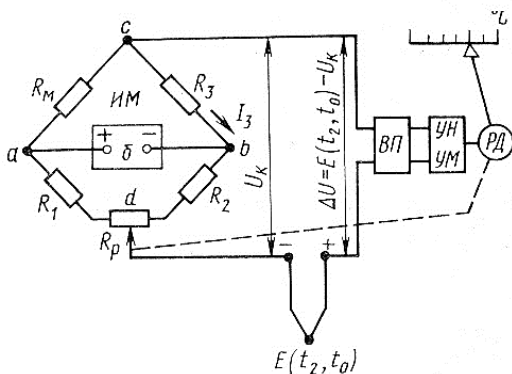


Рис. 2.2. Упрощенная схема автоматического потенциометра

Автоматические потенциометры выпускают самопишущими и показывающими. Один потенциометр может последовательно измерять и записывать от 1 до 12 показаний термопары. Потенциометры бывают регулирующими, с различным временем пробега шкалы стрелкой и т. д.

Материалы, инструмент, оборудование

1. Автоматический электронный потенциометр.
2. Термопара градуировки ХА (хромель-алюмель).
3. Нагревательная (муфельная) печь.
4. Нагреваемый образец.
5. Кузнечные клещи.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия электронного автоматического потенциометра и отдельных его элементов: усилителя, реверсивного двигателя, реохорда и т. д.
2. Установить термопару в нагреваемом образце и подключить ее к потенциометру.

3. Подготовить потенциометр к работе.
4. Собрать схему (рис. 2.3).

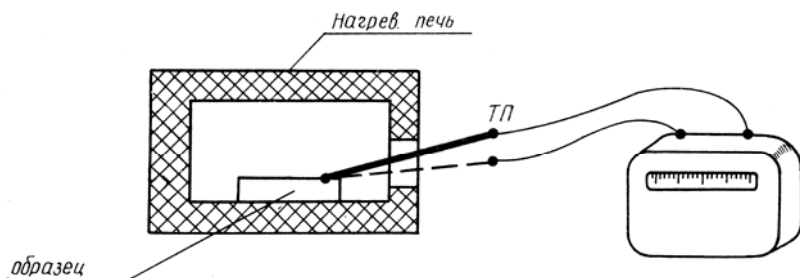


Рис. 2.3. Схема установки

5. Одновременно включить нагревательную печь и секундомер и наблюдать за изменением температуры. Отсчеты температуры производить по указывающей стрелке прибора, а отсчет времени – по секундомеру. Результаты замеров занести в таблицу измерений «При нагреве».

При нагреве

τ , мин	0	0,25	0,5	1	2	и т. д.
t , °C						

Через 30–40 мин выключить нагрев и снять характеристику образца при остывании. Эти результаты тоже занести в таблицу измерений «При остывании».

При остывании

τ , мин	0	0,25	0,5	1	2	и т. д.
t , °C						

Содержание отчета

1. Краткое описание автоматического потенциометра с указанием его основных характеристик.
2. Схема установки.
3. Таблицы экспериментальных данных.
4. Температурные характеристики образцов, построенные по экспериментальным данным.

Лабораторная работа № 3

ПОВЕРКИ ТЕРМОПАР МЕТОДОМ СЛИЧЕНИЯ

Цель работы: ознакомление с процессом поверки термопар методом сличения.

Теоретические сведения

Поверка технических термопар состоит из следующих операций:

а) проверка соответствия внешнего вида. Термопары должны быть представлены без защитных чехлов, термопары из благородных металлов – освобожденными от всякого рода арматуры. Поступающие на поверку термопары из благородных металлов взвешивают с точностью до 0,01 г или измеряют их длину. Термоэлектроды термопар из неблагородных металлов не должны иметь следов сварки, поверхность их должна быть чистой и гладкой. Принятые в поверку термопары из благородных металлов подвергаются очистке и отжигу;

б) проверка соответствия градуировочной характеристики поверяемой термопары стандартной.

При поверке термопар в интервале температур от 300 до 1200 °С в качестве образцовых применяются платинородий-платиновые термопары; для поверки термопар при температурах от 900–1600 °С – термопара типа ПР 30/6. Для поверки термопар в интервале температур от –50 до 0 °С применяются спиртовые криостаты.

Нагрев рабочих концов термопар при поверке производится в горизонтальных электрических печах.

Температура свободных концов образцовой термопары в течение всего процесса градуировки поддерживается равной 0 °С (смесь чистого истолченного льда с водой). Поверка может производиться и при иной температуре, но она должна измеряться с погрешностью не более 0,1 град и заноситься в протокол. Однако окончательные результаты градуировки термопары должны быть приведены к температуре свободных концов 0 °С.

Во всех случаях необходимо следить за тем, чтобы было обеспечено равенство температур мест контактов обоих термоэлектродов поверяемых термопар с соединительными проводами.

Для этого оголенные на 10–15 мм свободные концы термопары и соединительные провода скручивают или спаивают и погружают в

пробирки с трансформаторным маслом. Пробирки с маслом устанавливаются в смесь льда с водой или в воду, температура которой измеряется.

Процесс поверки термопар методом сличения (рис. 3.1), т. е. путем сравнения их термоЭДС с термоЭДС образцовых термопар, ведется следующим образом.

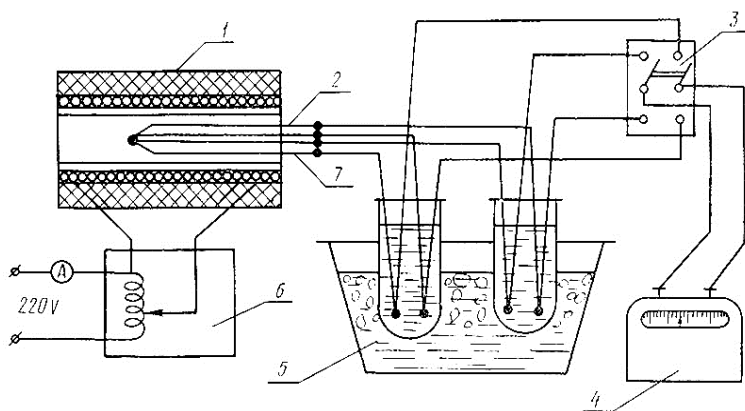


Рис. 3.1. Схема поверки термопар методом сличения:
 1 – горизонтальная электрическая печь; 2 – образцовая термопара;
 3 – переключатель; 4 – потенциометрическая установка;
 5 – термостат для свободных концов термопар; 6 – автотрансформатор;
 7 – поверяемая термопара

При достижении в печи необходимой температуры сила тока в нагревательной обмотке регулируется так, чтобы скорость изменения температуры в печи не превышала 0,2–0,4 град/мин. После этого последовательно отсчитывается термоЭДС всех термопар, начиная с образцовой сначала в прямом, затем в обратном порядке. Отсчеты повторяются и заканчиваются тогда, когда для каждой термопары будет сделано не менее четырех отсчетов.

Измерения термоЭДС термопары производятся через 100–200 °С при температурах, близких к целым сотням градусов. Всего должно быть снято значений термоЭДС не менее чем при четырех температурах. ТермоЭДС поверяемой и образцовой термопар определяется по средним значениям, найденным из отсчетов показаний каждой из этих термопар в соответствующей точке.

Для обеспечения равенства температуры рабочих концов образцовой и поверяемых термопар из неблагородных металлов они помещаются в никелевый блок и вместе с блоком погружаются в печь или термопары связываются в пучок.

При поверке стандартных термопар в интервале температур 0–1200 °С температура рабочего конца поверяемой термопары определяется по показаниям образцовой термопары с использованием при подсчетах стандартной градуировочной таблицы (табл. 3.1) платинородий-платиновой термопары одним из следующих способов:

1. Из наблюдений при температуре вблизи 500 °С получено среднее арифметическое значение термоЭДС образцовой термопары, равное 4,26 мВ, при температуре ее свободных концов 0 °С. По градуировочной таблице (табл. 3.2), данной в свидетельстве на образцовую термопару, температурам рабочего и свободного концов, равным 500 и 0 °С, соответствует термоЭДС 4,23 мВ.

Таблица 3.1

Градуировка ПП-1 (платинородий-платина)

Температура, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
–	0,000	–0,053	–0,103							
0	0,000	0,055	–0,112	0,173	0,234	0,299	0,364	0,432	0,500	0,571
100	0,643	0,717	0,792	0,869	0,947	1,026	1,106	1,187	1,269	1,352
200	1,436	1,521	1,606	1,692	1,779	1,867	1,955	2,044	2,133	2,223
300	2,314	2,406	2,498	2,591	2,684	2,777	2,871	2,965	3,060	3,154
400	3,249	3,345	3,440	3,536	3,633	3,730	3,826	3,923	4,021	4,119
500	4,218	4,316	4,415	4,515	4,615	4,715	4,815	4,915	5,016	5,118
600	5,220	5,322	5,425	5,528	5,631	5,734	5,837	5,941	6,046	6,151
700	6,256	6,362	6,467	6,573	6,679	6,786	6,893	7,000	7,108	7,216
800	7,325	7,434	7,543	7,653	7,763	7,872	7,983	8,094	8,205	8,316
900	8,428	8,540	8,653	8,765	8,878	8,992	9,106	9,220	9,334	9,449
1000	9,564	9,679	9,795	9,911	10,028	10,145	10,262	10,379	10,496	10,614
1100	10,732	10,850	10,968	11,086	11,205	11,324	11,443	11,563	11,683	11,803
1200	11,923	12,043	12,163	12,284	12,404	12,525	12,645	12,766	12,887	13,008
1300	13,129	13,250	13,371	13,492	13,613	13,734	13,855	13,975	14,096	14,217
1400	14,338	14,458	14,579	14,699	14,819	14,939	15,059	15,179	15,298	15,418
1500	15,537	15,656	15,775	15,893	16,011	16,129	16,247	16,364	16,481	16,598
1600	16,714	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 3.2

Градуировочная таблица

Температура, °С	ТермоЭДС по свидетельству, мВ	ТермоЭДС по стандарту, мВ	Поправка, мВ
200	1,446	1,436	-0,01
300	2,304	2,314	+0,01
400	3,259	3,249	-0,01
500	4,230	4,220	-0,01
600	5,200	5,220	+0,02

Для тех же температур из стандартной градуировочной табл. 3.1 находят термоЭДС, равную 4,22 мВ. Определяют разность между стандартным значением термоЭДС и термоЭДС образцовой термопары по свидетельству:

$$4,22 - 4,23 = -0,01 \text{ мВ.}$$

Полученную разность (поправку) алгебраически складывают со средним арифметическим значением термоЭДС:

$$4,26 + (-0,01) = 4,25 \text{ мВ.}$$

В стандартной градуировочной табл. 3.1 находят температуру, соответствующую 4,25 мВ, которая равна 503 °С. Это и будет искомая температура рабочего конца образцовой, а следовательно и поверяемых термопар.

2. Начальные условия те же. Находим разность между измеренной термоЭДС и термоЭДС, найденной из свидетельства. В нашем случае эта разность равна

$$4,26 - 4,23 = + 0,03 \text{ мВ.}$$

Величина приращений термоЭДС на градус для термопары каждого типа известна. В данном случае при температуре 500 °С

$$de/dt = 0,01 \text{ мВ/град.}$$

Отличие температуры рабочего конца термопары от 500 °С определяется путем деления полученной разности между измеренной термоЭДС и термоЭДС, найденной из свидетельства, на величину термоЭДС термопары на градус. В этом случае частное будет равно

$$\frac{0,03 \text{ мВ}}{0,01 \text{ мВ/град}} = +3 \text{ град.}$$

Следовательно, температура рабочего конца термопары равна

$$500 + (+ 3) = 503 \text{ °С.}$$

Далее в соответствующей стандартной градуировочной таблице (табл. 3.3) находится величина термоЭДС, соответствующая температуре рабочего конца поверяемой термопары. Путем сравнения этой термоЭДС со средним арифметическим значением термоЭДС поверяемой термопары, приведенным к температуре свободных концов 0 °С, определяется величина отклонения термоЭДС поверяемой термопары от значения термоЭДС стандартной градуировочной табл. 3.3.

Таблица 3.3

Градуировочная таблица стандартных термопар

Градуировка ХА (хромель-алюмель)

Температура, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	ТермоЭДС, мВ									
–	–	–0,39	–0,77	–	–	–	–	–	–	–
0	0	0,40	0,80	1,20	1,61	2,02	2,43	2,85	3,26	3,68
100	4,10	4,51	4,92	5,33	5,73	6,13	6,53	6,93	7,33	7,73
200	8,13	8,53	8,93	9,34	9,74	10,15	10,56	10,97	11,38	11,80
300	12,21	12,62	13,04	13,45	13,87	14,30	14,72	15,14	15,56	15,99
400	16,40	16,83	17,25	17,67	18,09	18,51	18,94	19,37	19,79	20,22
500	20,65	21,08	21,50	21,93	22,35	22,78	23,21	23,63	24,06	24,49
600	24,91	25,33	25,76	26,19	26,61	27,04	27,46	27,88	28,30	28,73
700	29,15	29,57	29,99	30,41	30,83	31,24	31,66	32,08	32,49	32,90
800	33,32	33,72	34,13	34,55	34,95	35,36	35,76	36,17	36,57	36,97
900	37,37	37,77	38,17	38,57	38,97	39,36	39,76	40,15	40,54	40,93
1000	41,32	41,71	42,09	42,48	42,88	43,26	43,64	44,02	44,40	44,78
1100	45,16	45,54	45,91	46,29	46,66	47,03	47,40	47,77	48,14	48,50

Градуировка ХК (хромель-копель)

Температура, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	ТермоЭДС, мВ									
–	–	–0,64	–1,27	–1,89	–2,50	–3,11	–	–	–	–
0	0	0,65	1,31	1,98	2,66	3,35	4,05	4,76	5,48	6,21
100	6,95	7,69	8,43	9,18	9,93	10,69	11,46	12,24	13,03	13,84
200	14,66	15,48	16,30	17,12	17,95	18,77	19,60	20,43	21,25	22,08
300	22,91	23,75	24,60	25,45	26,31	27,16	28,02	28,89	29,76	30,62
400	31,49	32,35	33,22	34,08	34,95	35,82	36,68	37,55	38,42	39,29
500	40,16	41,03	41,91	42,79	43,68	44,56	45,45	46,34	47,23	48,12
600	49,02	49,90	50,78	51,66	52,53	53,41	54,28	55,15	56,03	56,90
700	57,77	58,64	59,51	60,37	61,24	62,11	62,97	63,83	64,70	65,56
800	66,42	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Если величина отклонения термоЭДС не превышает допустимых (табл. 3.4), то термопара считается годной.

Таблица 3.4

Стандартная градуировочная таблица

Наименование термопар	Условное обозначение градуировки	Верхний предел длительного применения термопары, °С	Допустимые отклонения термоЭДС термопар от градуированных таблиц, ± мВ	
			В пределах от 0 до 300 °С	Выше 300 °С
Платинородий-платина	ПП-1	1300	0,01	$0,1 + 2,5 \times 10^{-5}(t^* - 300)$
Платинороди-евые	ПР30/6	1600	Не применяются	$0,0 + 13,3 \times 10^{-5}(t^* - 300)$
Хромель-алюмель	ХА	1100	0,16	$0,16 + 2,0 \times 10^{-4}(t^* - 300)$
Хромель-копель	ХК	600	0,20	$0,20 + 6,0 \times 10^{-4}(t^* - 300)$
Сплав НК-СА	НК-СА	1000	Для $t = 100$ °С 0,6 мВ	±0,15
			Для $t = 200$ °С 0,12 мВ	
			Для $t = 300$ °С 0,12 мВ	

t^* – температура рабочего спая термопары.

Материалы, инструмент, оборудование

1. Горизонтальная электрическая печь.
2. Образцовая термопара ПП-1.
3. Поверяемые термопары ХА.
4. Измерительные устройства (лабораторный потенциометр, милливольтметр).
5. Термостат.
6. Соединительные провода и переключатель.
7. Никелевый блок.
8. Клещи.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с термопарами и их характеристиками.
2. Ознакомиться с процессом поверки технических термопар методом сличения.
3. Собрать схему поверки технических термопар (см. рис. 3.1).
4. В соответствии с ранее описанной методикой провести четыре-пять отсчетов и занести их в протокол.
5. Произвести все необходимые расчеты, предусмотренные формой протокола поверки (табл. 3.5).

Лабораторная работа № 4

ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ЧЕРЕЗ СТЕНКИ ПЕЧИ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ ЕЕ РАБОТЫ

Цель работы: сравнить тепловые потоки через однослойную и двухслойную стенки печи; произвести расчет тепловых потерь через стенки печи, посчитанных на основе формул теплопроводности, и сравнить с тепловыми потерями, посчитанными по формулам теплоотдачи от поверхности стенки.

Теоретические сведения

В промышленных печах необходимая для нагрева металла температура печного пространства обеспечивается генерированием расчетного количества тепла с учетом тепловых потерь. Расчетное количество тепла получают в пламенных печах за счет сжигания топлива, в электропечах сопротивления – за счет преобразования электрической формы энергии в тепловую. Идеально изолированного печного пространства не бывает. В действительности всегда имеют место тепловые потери. К ним относятся потери тепла через стенки печи, загрузочные окна, различные технологические отверстия в окнах, потери тепла с уходящими газами и др.

Рассмотрим подсчет потерь тепла через стенку печи более подробно. В твердых телах передача тепла осуществляется колебательным движением молекул и свободных электронов, т. е. теплопроводностью. Все случаи распространения тепла теплопроводностью описывает общее дифференциальное уравнение теплопроводности – уравнение Фурье, связывающее температуру любой точки твердого тела со временем и пространственным положением данной точки:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right),$$

где t – температура точки твердого тела;

τ – время;

a – коэффициент температуропроводности;

x, y, z – координаты точки.

Из общего уравнения можно выделить частные случаи. Одним из таких частных случаев является независимость температуры от времени:

$$\partial t / \partial \tau = 0.$$

Такое температурное поле называется стационарным. Величина же теплового потока для плоской однородной стенки и *стационарного* температурного поля (рис. 4.1) будет

$$q_{\lambda_1} = \lambda \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{S}, \quad (4.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности стенки печи;

$t_{\text{вн}}$ – температура внутренней поверхности стенки печи;

$t_{\text{нар}}$ – температура наружной поверхности стенки печи;

S – толщина стенки.

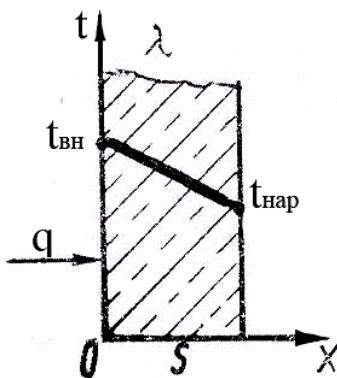


Рис. 4.1. Схема распределения температур при теплопередаче теплопроводностью через плоскую однородную стенку

С небольшими погрешностями можно рассматривать передачу тепла через стенки промышленных печей как случай стационарного теплового поля. Для уменьшения тепловых потерь и более рационального использования огнеупорных и теплоизоляционных материалов стенки промышленных печей делают многослойными (рис. 4.2).

Величина теплового потока для многослойной стенки определяется по формуле

$$q_{\lambda_2} = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n}}. \quad (4.2)$$

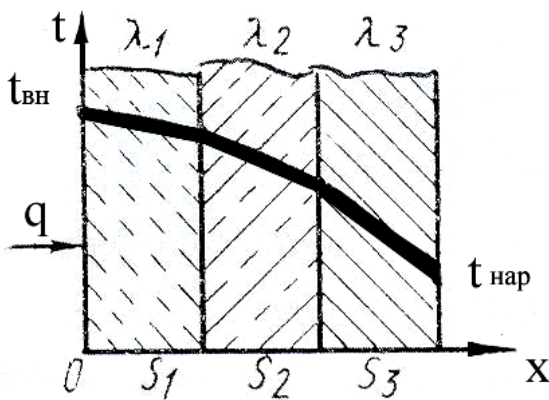


Рис. 4.2. Схема распределения температур при теплопередаче теплопроводностью через многослойную стенку

Итак, используя уравнения (4.1) и (4.2), можно решать следующие практические задачи:

- а) зная температуры и характеристики огнеупорных и теплоизоляционных материалов стенки, можно определить потери тепла;
- б) зная температуры и потери тепла, можно подобрать оптимальные размеры многослойной стенки промышленной печи;
- в) зная тепловой поток, характеристики стенок печи и температуру печного пространства, можно вычислить температуру наружной стенки печи.

Тепловой поток, прошедший через стенку печи, уносится окружающей средой с помощью конвективного теплообмена. Если известны температура стенки и температура среды, то тепловой поток можно определить по уравнению Ньютона. Например, для наружной стенки

$$q_{\alpha} = \alpha(t_{\text{нар}} - t_0), \quad (4.3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи;
 t_0 – температура воздуха.

Материалы, инструмент, оборудование

Работа выполняется на установке, состоящей из двух печей (рис. 4.3). Свод печи I выполнен из шамотного кирпича толщиной 65 мм. Свод печи II – двухслойный: внутренний слой выполнен из магнезита, наружный – из шамота, оба толщиной по 65 мм.

В своды обеих печей встроены термопары ХА, соединенные через переключатель с милливольтметром (потенциометром). Расположение термопар показано на рис. 4.3.

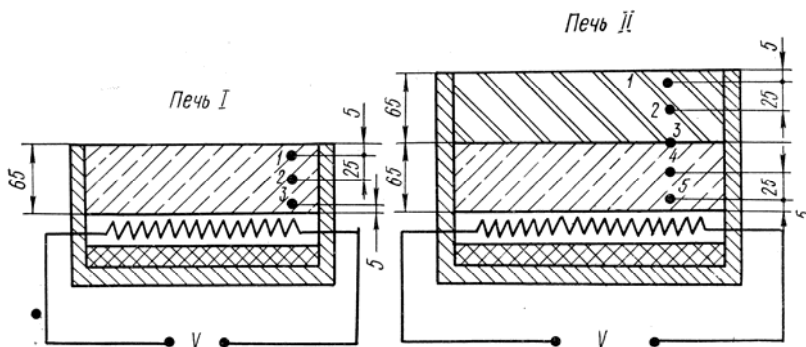


Рис. 4.3. Схема установки и расположения термопар в печи

Порядок выполнения работы

1. Установить стационарное температурное поле в обеих печах.
2. Через каждые 15–20 мин записать показания всех термопар (допускается нестационарный режим 10–15 град/ч).
3. Построить графики распределения температур по толщине для однослойной и двухслойной стенок печи.

4. Экстраполяцией найти температуры на внутренней $t_{вн}$ и наружной $t_{нар}$ поверхностях стенок.

5. Определить тепловой поток по уравнению (4.1) для однослойной стенки печи.

6. Определить тепловой поток для двухслойной стенки печи сначала по уравнению (4.2), а затем – по уравнению (4.3).

Для расчетов взять последние записи температур.

Коэффициенты теплопроводности λ определяются в зависимости от средней температуры слоя (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Температурные характеристики

Наименование огнеупоров	Температурный коэффициент теплопроводности λ_1 , Вт/(м·К)	Коэффициент λ_1 , Вт/(м·К), при рабочей температуре	Рабочая температура, К
<i>Кирпич</i>			
Шамотный	$(0,72 + 0,0005t)1,16$	1,65	1620–1720
Пеношамотный	$(0,24 + 0,0002t)1,16$	0,59	1620
Легковесный шамот	$(0,09 + 0,000125t)1,16$	0,29	1570
Динасовый	$(0,8 + 0,0006t)1,16$	2,11	1970
Магнезитовый	$(4,0 + 0,0015t)1,16$	0,75	1920–1970
Хромомагнезитовый	$1,6 - 1,7(0 - 600 \text{ }^\circ\text{C})1,16$		1970
Хромитовый	$(1,1 + 0,00035t)1,16$	1,966	1920–1970
Диатомитовый	$(0,097 + 0,0002t)1,16$	0,309	1120
<i>Изделия</i>			
Силлиманитовые (муллитовые)	$(1,45 - 0,0002t)1,16$	1,299	1920
Корундовые	$(1,8 - 0,0016t)1,16$	5,24	1920–1970
Циркониевые	$(1,12 - 0,00055t)1,16$	2,447	2020–2070
Карбофракс	$(18 - 0,009t)1,16$	15,66	1670–1770
Угольные	$(20 - 0,030t)1,16$	16,24	2270
Графитовые	$(140 - 0,035t)1,16$	81,20	2270
<i>Изоляционные материалы</i>			
Асбест распушенный	$(1,112 - 0,00016t)1,16$	0,2598	700
Диатомит (вермикулит)	$(0,062 - 0,000225t)1,16$	0,280	900–1100
Шлаковая вата	$(0,05 - 0,000125t)1,16$	0,167	750

При двухслойной кладке средняя температура внутреннего слоя равна

$$t_{\text{ср1}} = \frac{t_{\text{вн}} + t_0}{2},$$

где $t_{\text{вн}}$ – температура внутренней поверхности стенки печи;
 t_0 – температура воздуха.

Средняя температура наружного слоя

$$t_{\text{ср2}} = \frac{t_{\text{ср1}} + t_0}{2}.$$

Коэффициент теплоотдачи α , входящий в уравнение (4.3), складывается из коэффициентов теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией:

$$\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}},$$

и подсчитывается по упрощенной формуле

$$\alpha = 8 + 0,05t_{\text{нар}}.$$

Результаты опытов и вычислений поместить в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты опытов

Однослойная стенка						
t_1	t_2	t_3	$t_{\text{вн}}$	$t_{\text{нар}}$	$\lambda, \text{Вт/м} \cdot \text{°C}$	$q_{\lambda_1}, \text{Вт/м}^2$
°C						

Двухслойная стенка											
t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	$t_{\text{вн}}$	$t_{\text{нар}}$	λ_1	λ_2	q_{λ_2} , Вт/м ²	α , Вт/м ² · °С ⁴	q_α , Вт/м ²
°С						Вт/м · °С					

Содержание отчета

1. Краткое содержание работы.
2. Схема опытной установки.
3. Таблицы опытных данных.
4. Графики распределения температур, построенные по экспериментальным данным.

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ МЕТАЛЛА

Цель работы: определить суммарный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{л+к}$, коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_к$, коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_л$ и коэффициент излучения окисленной меди $C_{пр}$, а также сравнить роль теплоотдачи конвекцией ($\alpha_к$) и излучением ($\alpha_л$) при различных температурах образца.

Теоретические сведения

Основным процессом, происходящим при охлаждении металла, является процесс передачи тепла с поверхности охлаждаемого тела в окружающее пространство. Передача тепла происходит соприкосновением (конвекцией) и лучеиспусканием.

Сущность передачи тепла конвекцией заключается в том, что тепло переносится вследствие движения частиц среды, т. е. молекулы движущейся среды (газа или жидкости), соприкасаясь с телом, отдают его поверхности тепло или отнимают тепло от поверхности в зависимости от того, где выше температура, поэтому передача тепла конвекцией тесно связана с характером движения этих частиц и может происходить между поверхностью твердого тела и окружающим ее газом (воздухом).

В соответствии с характером движения газа (воздуха) различают свободную конвекцию (теплопередача при свободном движении газа или воздуха, например при естественном охлаждении стенки печи, металла в среде окружающего воздуха) или вынужденную конвекцию (теплопередача при вынужденном движении газа или воздуха, например при подаче воздуха вентилятором).

Вынужденная конвекция в соответствии с режимом движения делится на теплоотдачу конвекцией при ламинарном режиме и теплоотдачу конвекцией при турбулентном режиме.

Тепловой поток при теплопередаче конвекцией считают пропорциональным разности температур поверхностей тела и окружающей среды (формула Ньютона):

$$q_k = \alpha_k (t_n - t_{cp}),$$

где α_k – коэффициент пропорциональности или коэффициент теплоотдачи конвекцией, т. е. количество тепла, которое отдается поверхностью твердого тела площадью 1 м^2 в течение часа при разности температур между поверхностью тела (t_n) и окружающей средой (t_{cp}) в $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

При свободной конвекции в жидкостях и газах (воздухе), окружающих поверхность теплоотдающего или тепловоспринимающего тела, благодаря изменению плотности частиц, соприкасающихся с поверхностью, возникают вертикальные потоки. При $t_n > t_{cp}$ частицы будут двигаться вдоль поверхности вверх, а при $t_n < t_{cp}$ – вниз. Свободное движение частиц зависит от теплообмена: чем интенсивнее теплообмен, тем интенсивнее и движение.

Вначале течение частиц вдоль поверхности имеет струйчатый ламинарный характер – зона I (рис. 5.1). Далее по направлению движения толщина движущегося слоя увеличивается и характер движения частиц становится неустойчивым, волновым – зона II, а затем переходит в вихревой, турбулентный, с отрывом вихрей от стенки – зона III. С изменением характера движения частиц изменяется теплоотдача.

При ламинарном режиме с увеличением толщины слоя коэффициент теплоотдачи по направлению движения падает, а затем при волновом и турбулентном режиме быстро возрастает и остается постоянным.

Сложность движения определяет сложность передачи тепла конвекцией.

Для определения коэффициента теплоотдачи α_k обычно пользуются экспериментальными формулами, разработанными в критерильном виде на основе теории подобия.

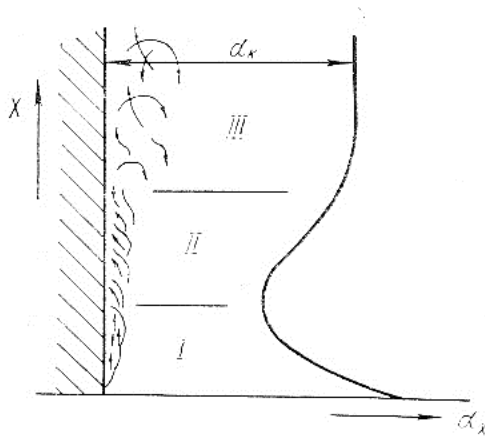


Рис. 5.1. Характер движения частиц и изменение коэффициента теплоотдачи α_k при свободном движении воздуха (при естественном охлаждении металла)

Расчетная формула для определения коэффициента теплоотдачи α_k при расположении нагреваемого или охлаждаемого тела в неограниченном объеме в критериальном виде записывается так:

$$Nu = C (Gr_m Pr_m)^n \left(\frac{Pr_{cp}}{Pr_{II}} \right)^{0,25},$$

где $Nu = \frac{\alpha_k l}{\lambda_m}$ – критерий Нуссельта, в котором:

α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией;

l – определяющий размер: диаметр d для горизонтальной трубы, высота h для вертикальной трубы или вертикальной плоскости, для горизонтальной пластины – ее меньшая сторона;

λ_m – коэффициент теплопроводности окружающей среды (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Коэффициент кинематической вязкости ν , коэффициент теплопроводности λ и критерий Прандтля Pr для воздуха и дымовых газов среднего состава (11 % H_2O и 13 % CO_2)

Температура, °С	Воздух			Дымовые газы среднего состава		
	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$	Pr	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$	Pr
0	13,3	2,44	0,707	12,2	2,28	0,72
100	23,0	3,21	0,688	21,5	3,13	0,69
200	34,8	3,93	0,68	32,8	4,01	0,67
300	48,2	4,61	0,674	45,8	4,84	0,65
400	63,0	5,21	0,678	60,4	5,7	0,64
500	79,3	5,75	0,687	76,3	6,56	0,63
600	96,8	6,23	0,699	93,6	7,42	0,62
700	115	6,71	0,706	112	8,27	0,61
800	135	7,18	0,713	132	9,15	0,60
900	155	7,63	0,717	152	10,01	0,59
1000	178	8,12	0,719	174	10,9	0,58
1100	199	8,47	0,722	197	11,75	0,57
1200	223	8,89	0,724	221	12,56	0,56
1300	–	–	–	245	13,49	0,55
1400	273	9,96	–	272	14,42	0,54
1500	–	–	–	297	15,35	0,53
1600	328	11,22	–	323	16,28	0,52

Индекс m здесь и в других местах означает, что физические параметры или критерии берутся при температуре пограничного слоя, находимой как среднеарифметическое от температуры поверхности тела и окружающей среды, т. е.

$$t_m = \frac{t_n + t_{cp}}{2};$$

$$Gr_m = \frac{l^3 g \beta (t_n - t_{cp})}{\nu_m^2} \quad \text{– критерий Грасгофа, характеризующий}$$

процесс свободного движения частиц среды, в который входят:

g – ускорение силы тяжести;

β – коэффициент объемного расширения;

ν_m – коэффициент кинематической вязкости (см. табл. 5.1);

$Pr = \frac{\nu_m}{a_m}$ – критерий Прандтля (см. табл. 5.1);

a_m – коэффициент температуропроводности;

C и n – постоянные, связанные с величиной произведения $(Gr_m Pr_m)$ и формой поверхности (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Значения постоянных C и n

Участки	$(Gr \cdot Pr)_{cp}$	C	n
1	От 0 до $1 \cdot 10^{-3}$	0,50	0
2	От $1 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
3	От $5 \cdot 10^2$ до $2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
4	От $2 \cdot 10^7$ до $1 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3

При $10^3 < (Gr_m Pr_m) < 10^9$ (ламинарный режим) $n = 0,25$, $C = 0,5$ – для горизонтальных труб и $C = 0,76$ – для вертикальных поверхностей.

При $(Gr_m Pr_m) > 10^9$ (турбулентный режим) $n = 0,33$ и $C = 0,15$ для горизонтальных труб и вертикальных поверхностей.

Для газов (воздуха) $Pr = \text{const} \frac{Pr_{cp}}{Pr_{г}} = 1$, и поэтому критериальные

уравнения упрощаются.

Излучение (лучеиспускание). Этот вид теплоотдачи связан с распространением в пространстве электромагнитных волн. На поверхности излучающего тела тепловая энергия превращается в электромагнитные колебания (волны), которые, попадая на поверхность какого-либо другого тела, опять превращаются в тепловую энергию. Следовательно, интенсивность лучеиспускания определяется температурой.

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием может быть определен по уравнению

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ср}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{п}} - t_{\text{ср}}},$$

где $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения тела, равный произведению $C_0 \varepsilon$.

Здесь C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела:

$$C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4};$$

ε – степень черноты тела.

Таким образом, тепло, отдаваемое поверхностью твердого тела окружающей среде за время $d\tau$, определяется по следующей формуле:

$$dQ = C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ср}}}{100} \right)^4 \right] F d\tau + \alpha_{\text{к}} (t_{\text{п}} - t_{\text{ср}}) F d\tau, \quad (5.1)$$

где $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения;

$T_{\text{п}}$ и $t_{\text{п}}$ – температура поверхности твердого тела;

$T_{\text{ср}}$ и $t_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды;

F – поверхность тела;

$d\tau$ – продолжительность теплоотдачи;

$\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности тела конвекцией.

Первый член этого уравнения выражает тепло, отдаваемое поверхностью тела путем лучеиспускания, а второй – тепло, отдаваемое конвекцией (соприкосновением).

Формулу (5.1) можно упростить, сведя ее к формулам, например, выражающим закон конвекции. В этом случае будем иметь

$$dQ = \alpha_{\text{л+к}} (t_{\text{п}} - t_{\text{ср}}) F d\tau. \quad (5.2)$$

При этом значение $\alpha_{л+к}$ будет

$$\alpha_{л+к} = \frac{C_{пр} \left[\left(\frac{T_{п}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ср}}{100} \right)^4 \right]}{t_{п} - t_{ср}} + \alpha_{к} = \alpha_{л} + \alpha_{к} .$$

Количество тепла, отдаваемого поверхностью тела окружающей среде, также можно определить по изменению теплосодержания тела:

$$dQ = cMdt_c, \quad (5.3)$$

где c – удельная теплоемкость тела при данной температуре;

M – масса охлаждаемого тела;

dt_c – средняя по массе температура тела.

Если охлаждаемое тело имеет высокий коэффициент теплопроводности и небольшую толщину, то разностью температур по сечению тела можно пренебречь и считать, что

$$t_{ср} = t_{п} = t .$$

Тогда, приравняв правые части уравнений (5.2) и (5.3), получим для скорости охлаждения следующее выражение:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\alpha_{л+к} (t_{п} - t_{ср}) F}{cM}. \quad (5.4)$$

Таким образом, при известных значениях $dt/d\tau$, c , M и F по данному уравнению можно определить величину суммарного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{л+к}$. Скорость охлаждения тела $dt/d\tau$ при различных значениях температуры можно определить графическим путем, измеряя температуру охлаждающего тела в различные моменты времени и построив графики зависимости $t = f(\tau)$.

Это все справедливо и для нагрева тел малой толщины.

Материалы, инструмент, оборудование

1. Электрическая печь.
2. Стальной или медный образец. Размеры образцов: диаметр $d = 30$ мм; высота $h = 100$ мм.
3. Термопары.
4. Прибор для измерения температуры (потенциометр или милливольтметр).
5. Штатив для подвески образца.
6. Секундомер.
7. Клещи.

Порядок выполнения работы

1. Поместить образец в печь, предварительно разогретую до 900 °С.
 2. После нагрева образца до 800 – 850 °С быстро вытащить его из печи и подвесить на штатив.
 3. Произвести запись температуры образца: первые 10 измерений температуры образца произвести через каждые 15 с, последующие измерения температуры образца – через каждые 30 с.
 4. Построить график зависимости $t = f(\tau)$.
 5. Для четырех-пяти значений температур (по указанию преподавателя) вычислить величину скорости охлаждения образца $dt/d\tau$.
 6. Для заданных значений температур определить суммарный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{л+к}$ по уравнению (5.4).
 7. Определить коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_к$.
 8. Определить коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием $\alpha_л$.
 9. По уравнению (5.1) определить коэффициент излучения $C_{пр}$ данного образца.
- Результаты опытов и вычислений поместить в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Результаты обработки опытных данных

№ пп	τ	t	$\frac{dt}{d\tau}$	$\alpha_{л+к}$	$\alpha_к$	$\alpha_л$	$C_{пр}$

Лабораторная работа № 6

НАГРЕВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Цель работы

1. По опытным данным построить кривые $t = f(\tau)$ для поверхности и центра образцов, изготовленных из стали, магнезита и шамота и сравнить ход нагрева этих образцов (разность температур поверхности и центра, скорость нагрева).

2. Определить значения температуры поверхности и центра образцов по теоретической формуле (при решении уравнения теплопроводности) и сравнить их с экспериментальными значениями.

Теоретические сведения

Материал, помещенный в разогретую печь, получает тепло излучением от газообразных продуктов горения и стен рабочего пространства, а также конвекцией от продуктов горения. Тепло с поверхности материала передается внутрь его теплопроводностью. Распространение тепла теплопроводностью выражает дифференциальное уравнение теплопроводности – уравнение Фурье, устанавливающее связь между временным и пространственным изменением температуры тела

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right).$$

Если нагреваемое цилиндрическое тело имеет длину, в несколько раз превышающую диаметр, то можно считать, что тепло поступает только через боковую поверхность.

В данном случае для цилиндра уравнение Фурье имеет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right),$$

где a – коэффициент температуропроводности;

t – температура в точке с координатой r в момент времени τ .

Решение дифференциального уравнения теплопроводности выполняются на основании начальных и граничных условий (условий однозначности).

Начальным условием называется распределение температуры в теле в какой-либо момент времени (обычно в начальный: $\tau = 0$).

Граничными или *поверхностными* называются условия, характеризующие изменение температуры на границе (на поверхности) тела или тепловое взаимодействие поверхности тела с окружающей его средой.

Различают граничные (поверхностные) условия:

первого рода, если задано распределение температуры на поверхности тела;

второго рода, если известна величина теплового потока на поверхности тела;

третьего рода, если задана температура среды, окружающей тело, и известен закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Решение условия третьего рода рассмотрим более подробно, так как на практике чаще всего приходится сталкиваться с граничным условием третьего рода (нагрев тела в среде с постоянной температурой), которое записывается так:

начальное условие: при $\tau = 0$, $t = t_{\text{нач}} = \text{const}$;

граничное условие: тепловой поток на поверхности пропорционален разности температур между окружающей средой и поверхностью, т. е.

$$q_{\text{п}} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x_{\text{при } x = \pm s}} = \alpha_{\text{л+к}} (t_{\text{ср}} - t_{\text{п}}),$$

где $\alpha_{\text{л+к}}$ – коэффициент пропорциональности или коэффициент теплоотдачи на поверхности тела (за счет лучеиспускания и конвекции);

λ – коэффициент теплопроводности тела;

$\frac{\partial t}{\partial x}$ – температурный градиент.

Решение основного дифференциального уравнения при этих условиях в общем виде будет

$$\theta = \frac{t_{\text{ср}} - t_x}{t_{\text{ср}} - t_{\text{нач}}} = f\left(\text{Bi}; \text{Fo}; \frac{x}{S}\right),$$

где θ – температурный критерий, определяющий значения температуры (поверхности или центра) пластины или цилиндра;

Bi – критерий Био, характеризующий соотношение между количеством тепла, получаемого поверхностью, и количеством тепла, отводимого внутрь тела.

$$\text{Для цилиндра } \text{Bi} = \frac{\alpha_{\text{л+к}} R}{\lambda}, \text{ для пластины } \text{Bi} = \frac{\alpha_{\text{л+к}} S}{\lambda};$$

Fo – критерий Фурье, характеризующий подобие при распределении тепла теплопроводностью внутри тела:

$$\text{Fo} = \frac{a\tau}{S^2 (R^2)},$$

где a – коэффициент температуропроводности, который является функцией теплопроводности, теплоемкости и плотности, т. е.

$$a = \frac{\lambda}{c\rho},$$

где c – удельная теплоемкость для средней по массе температуры тела;

ρ – плотность.

Для стали $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$.

Для шамота $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$.

Для магнезита $\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$.

Значения функций $f(\text{Bi}; \text{Fo})$ для поверхности ($x = \pm S$ или $r = R$) и для центра ($x = 0$ или $r = 0$) пластины и цилиндра в зависимости от критериев Био и Фурье берутся из графиков, построенных Д.В. Будриным.

Распределение температуры по сечению тела подчиняется закону параболы, а средняя по массе температура тела:

– для пластины

$$t_M^{\text{cp}} = t_{\text{ц}} + \frac{1}{3} \Delta t_M = t_{\text{п}} - \frac{2}{3} \Delta t_M;$$

– для цилиндра

$$t_M^{\text{cp}} = t_{\text{ц}} + \frac{1}{2} \Delta t_M = t_{\text{п}} - \frac{1}{2} \Delta t_M,$$

где $\Delta t_M = t_{\text{п}} - t_{\text{ц}}$ – разность температур между поверхностью и центром тела.

Приведенные формулы и указанные графики Д.В. Будрина можно использовать и для случая охлаждения тел в среде с постоянной температурой, т. е. когда $t_{\text{cp}} < t_{\text{нач}}$.

При сложных начальных и граничных условиях математическое решение уравнения теплопроводности не всегда возможно. В этих случаях задачу иногда можно решить приближенно – методом конечных разностей с удовлетворительными для практики результатами.

Так как в электрических печах почти все тепло передается лучеиспусканием, то коэффициент теплопередачи определяется по формуле

$$\alpha_{\text{л+к}} = \frac{C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{печи}} - t_{\text{п}}},$$

где $T_{\text{печи}}$, $T_{\text{п}}$, $t_{\text{печи}}$, $t_{\text{п}}$ – температура в печи и температура поверхности;

$C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения:

$$C_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)},$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,8$ – степени черноты металла и стен печи;

F_1, F_2 – площади поверхности металла и стен печи.

Так как температура поверхности образца при его нагреве изменяется, то расчет следует вести по среднегеометрическому значению коэффициента теплопередачи

$$\alpha_{л+к} = \sqrt{\alpha_н \alpha_к},$$

где $\alpha_н$ и $\alpha_к$ – коэффициенты теплоотдачи, подсчитанные по температуре поверхности образца в начале и в конце рассматриваемого промежутка времени.

Коэффициент теплопроводности λ , входящий в критерий Био, определить в зависимости от средней по массе и по времени температуры образца (табл. 6.1), т. е.

$$t_\lambda = \frac{t_{нач} + \frac{t_п + t_ц}{2}}{2}.$$

Таблица 6.1

Зависимость теплопроводности углеродистых и легированных сталей, а также цветных сплавов λ , Вт/м·град, от температуры t , °С

Марка стали	$\frac{t}{\lambda}$									
	20	100	200	300	600	900	1200	-	-	-
Железо	$\frac{20}{73,3}$	$\frac{100}{67,5}$	$\frac{200}{61,6}$	$\frac{300}{57,6}$	$\frac{600}{40,7}$	$\frac{900}{34,9}$	$\frac{1200}{36,6}$	-	-	-
20	$\frac{100}{77,9}$	$\frac{300}{60,5}$	$\frac{600}{38,4}$	$\frac{900}{32,6}$	$\frac{1200}{32,6}$	-	-	-	-	-
30	$\frac{100}{75,6}$	$\frac{200}{64,6}$	$\frac{300}{44}$	$\frac{500}{38,1}$	$\frac{750}{26,3}$	$\frac{900}{26,3}$	-	-	-	-
45	$\frac{100}{67,7}$	$\frac{200}{54,9}$	$\frac{400}{35,5}$	$\frac{500}{31,4}$	$\frac{600}{30,2}$	$\frac{900}{26,8}$	$\frac{1200}{27,9}$	-	-	-
60	$\frac{100}{67,5}$	$\frac{200}{53,2}$	$\frac{400}{35,9}$	$\frac{500}{30,5}$	-	-	-	-	-	-

Окончание табл. 6.1

Марка стали	$\frac{t}{\lambda}$									
У8	$\frac{100}{43}$	$\frac{300}{42,2}$	$\frac{600}{35,1}$	$\frac{900}{30,5}$	–	–	–	–	–	–
У13	$\frac{46}{39}$	$\frac{210}{37}$	$\frac{526}{23,4}$	$\frac{750}{23,2}$	$\frac{906}{21,5}$	–	–	–	–	–
12ХН3	$\frac{17}{30,9}$	$\frac{500}{25,6}$	$\frac{750}{21,3}$	$\frac{910}{18,8}$	–	–	–	–	–	–
18ХНВ	$\frac{67}{23,8}$	$\frac{230}{24,8}$	$\frac{531}{28,1}$	$\frac{837}{24,4}$	–	–	–	–	–	–
1Х18Н9Т	$\frac{0}{13,1}$	$\frac{100}{15,6}$	$\frac{200}{17,5}$	$\frac{300}{19,4}$	$\frac{400}{21,1}$	$\frac{500}{22,3}$	$\frac{600}{23,6}$	$\frac{700}{24,8}$	$\frac{800}{26,8}$	$\frac{1200}{29,8}$
Р9	$\frac{43}{21,5}$	$\frac{226}{23,6}$	$\frac{464}{22,4}$	$\frac{706}{28,5}$	$\frac{854}{27}$	–	–	–	–	–
Р18	$\frac{0}{24,3}$	$\frac{200}{27,2}$	$\frac{400}{28,5}$	$\frac{600}{27,2}$	$\frac{800}{25,9}$	$\frac{900}{26,8}$	$\frac{1000}{27,7}$	$\frac{1200}{29,3}$	–	–
Латунь ЛТ90	$\frac{0}{102,4}$	$\frac{100}{117,5}$	$\frac{200}{113,7}$	$\frac{300}{148,9}$	$\frac{400}{166,3}$	$\frac{500}{180,3}$	$\frac{600}{195,4}$	–	–	–
Л62	$\frac{100}{77,9}$	$\frac{200}{83,7}$	$\frac{300}{90,7}$	$\frac{400}{97,7}$	–	–	–	–	–	–
Бронза АМц- 9-2	$\frac{100}{60,5}$	$\frac{200}{67,5}$	$\frac{300}{75,6}$	$\frac{400}{82}$	–	–	–	–	–	–
Монель- металл	$\frac{100}{27,9}$	$\frac{200}{32}$	$\frac{300}{33,7}$	$\frac{400}{34,9}$	–	–	–	–	–	–
Алюминие- вые сплавы АК2, Д1, Д6	$\frac{20}{139,6}$	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Материалы, инструмент, оборудование

1. Муфельная (электрическая) печь, в которой поддерживается постоянная температура.
2. Цилиндрические образцы, изготовленные из стали, магнетита и шамота (размеры образцов: $d = 40$ мм; $h = 100$ мм).
3. Термопары.

4. Прибор для измерения температуры (потенциометр или милливольтметр).

5. Секундомер.

6. Клещи.

Термопары встроены в центре и на поверхности каждого образца. Одна термопара введена в печь для измерения температуры печи. Все термопары через переключатель соединены с прибором (потенциометром или милливольтметром).

Порядок выполнения работы

1. В нагреваемую печь поместить образец, изготовленный из стали.

2. Через минуту произвести измерение температуры поверхности образца, еще через 30 с – центра образца. Далее с интервалом в 1 мин произвести измерения температуры поверхности и центра образца. В промежутках между этими измерениями записать температуру печи.

3. При разнице температуры центра образца и температуры печи в 40–50 °С измерения прекратить.

4. Далее в печь поместить образец, изготовленный из магнезита, а затем из шамота, и измерения температуры произвести в том же порядке, что и для стального образца.

5. Построить кривые нагрева образца

$$t_{\text{п}} = f(\tau) \quad \text{и} \quad t_{\text{ц}} = f(\tau).$$

6. Вычислить критерий

$$Bi = \frac{\alpha_{\text{л+к}} R}{\lambda}.$$

7. Вычислить критерий Фурье

$$Fo = \frac{a\tau}{R^2}.$$

8. По графикам Д.В. Будрина (рис. 6.1, 6.2) определить температурные критерии:

для поверхности цилиндра

$$\theta = \frac{t_{\text{ср}} - t_{\text{п}}}{t_{\text{ср}} - t_{\text{нач}}};$$

для центра цилиндра

$$\theta = \frac{t_{\text{ср}} - t_{\text{ц}}}{t_{\text{ср}} - t_{\text{нач}}}.$$

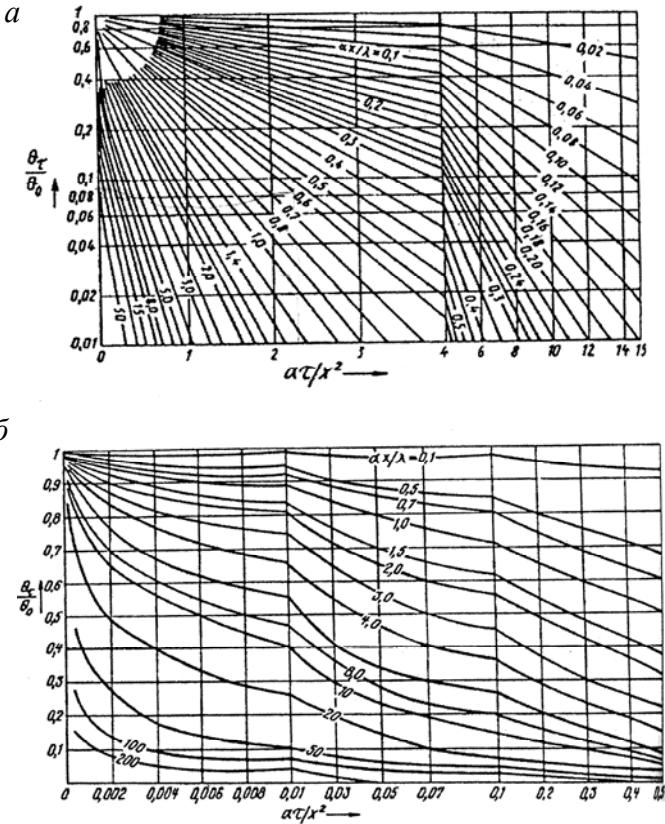


Рис. 6.1. Относительная температура поверхности цилиндра:
 а – $Fo < 15$; б – $Fo < 0,5$

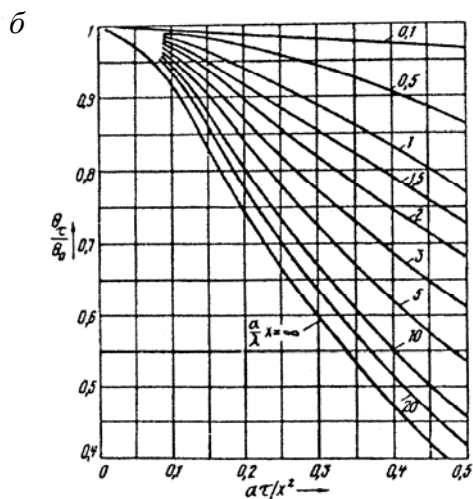
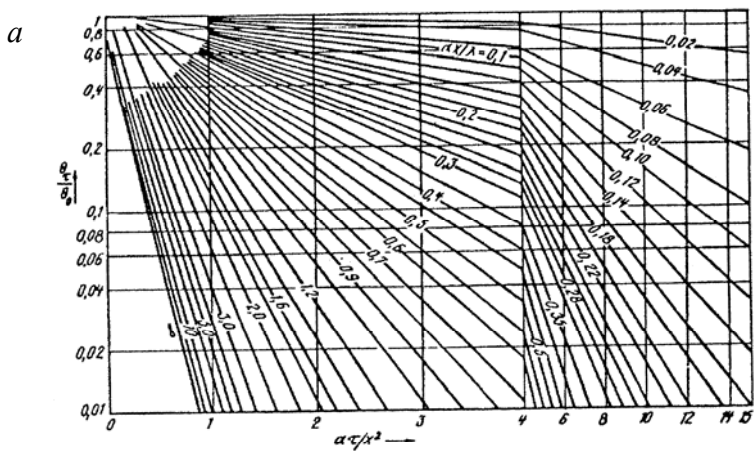


Рис. 6.2. Относительная температура середины цилиндра:
a – $Fo < 15$; *б* – $Fo < 0,5$

9. По полученным значениям температурных критериев найти температуру в центре $t_{ц}$ и температуру на поверхности $t_{п}$ образца. Результаты опытов и вычислений поместить в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты обработки опытных данных

Материал образца	$t_{\text{печ}},$ $^{\circ}\text{C}$	$\tau,$ мин	$t_{\text{п}}^{\text{оп}}$	$t_{\text{ц}}^{\text{оп}}$	$T_{\text{нач}}$	Bi	Fo	$\theta_{\text{п}}$	$\theta_{\text{ц}}$	$t_{\text{п}}^{\text{теор}}$	$t_{\text{ц}}^{\text{теор}}$
			$^{\circ}\text{C}$							$^{\circ}\text{C}$	

Лабораторная работа № 7

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ЗАГОТОВОК И ДЕТАЛЕЙ В КАМЕРНЫХ ПЕЧАХ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ПЕЧИ

Цель работы: произвести расчет времени нагрева заготовок и деталей в печах с постоянной температурой и построить график продолжительности нагрева заготовок $\tau = f(d)$.

Теоретические сведения

Нагрев мелких и средних заготовок, а также небольших слитков на поду камерных печей с постоянной температурой широко применяют при обработке металлов давлением.

При расчетах нагрева в практических условиях на поду камерных печей приходится иметь дело с так называемым несимметричным нагревом.

Симметричным называется нагрев, когда теплопередача с обеих сторон нагреваемой пластины или во всех точках боковой поверхности цилиндра происходит одинаково. Распределение температур в этом случае показано на рис. 7.1, а.

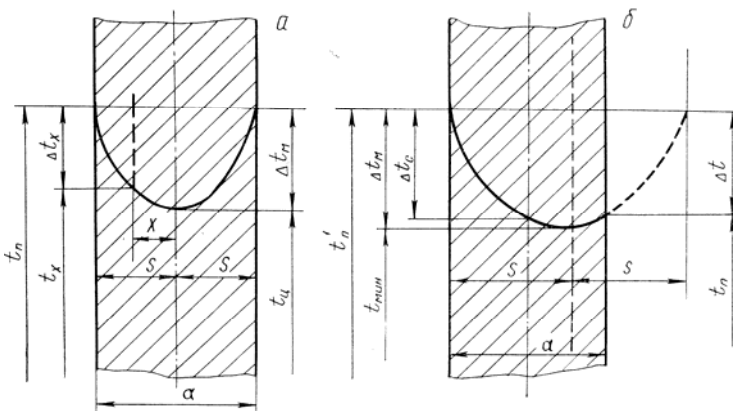


Рис. 7.1. Распределение температур по сечению тела при симметричном (а) и несимметричном (б) нагреве

Точка самой низкой температуры находится в геометрическом центре тела, а расстояние от нее до поверхности (расчетная толщина S_p) будет равно половине толщины пластины или радиусу цилиндра:

$$S_p = \frac{S}{2} \quad \text{или} \quad S_p = R.$$

Практически же при нагреве заготовок, лежащих на поду камерных печей, теплопередача происходит неодинаково со всех сторон. Такой нагрев называется несимметричным (рис. 7.1, б).

Расчетную толщину (радиус) заготовки при несимметричном нагреве определяют по формуле

$$S_p = K_n S \quad \text{или} \quad R = K_n D,$$

где S – толщина пластины;

D – диаметр цилиндра;

K_n – коэффициент несимметричности нагрева: при одностороннем нагреве $K_n = 1$, при двустороннем (симметричном) нагреве $K_n = 0,5$, при несимметричном $0,5 < K_n < 1,0$.

Если измерить температуру в двух точках – на наружной поверхности и в геометрическом центре тела, то коэффициент K_n можно определить по следующим формулам:

для пластины

$$K_n = \frac{a \Delta t_c}{\upsilon_n x^2} + 0,25;$$

для цилиндра

$$K_n = \frac{a \Delta t_c}{\upsilon_n R^2} + 0,25,$$

где a – коэффициент температуропроводности;

υ_n – скорость нагрева.

При определении продолжительности нагрева заготовок в печах различают случаи нагрева «тонких» и «массивных» тел.

Для установления границ «тонких» и «массивных» заготовок пользуются критерием Био, характеризующим соотношение между количеством тепла, полученным поверхностью, $\alpha_{л+к}$ и количеством тепла, отведенным внутрь, $\lambda/S(R)$:

$$Bi = \frac{\alpha_{л+к}}{\lambda/S(R)} = \frac{\alpha_{л+к}S(R)}{\lambda}.$$

Если значение критерия Био велико (процесс теплопередачи на поверхность происходит интенсивнее отвода тепла внутрь тела), то нагрев происходит с большой разностью температур между поверхностью и центром. Если значение критерия Био мало (при более интенсивном процессе отвода тепла с поверхности внутрь), то разность температур по сечению нагреваемого тела будет небольшой. В первом случае будем иметь «массивное» (с точки зрения нагрева) тело, во втором – «тонкое» тело.

Теоретические и экспериментальные данные показывают, что «тонкими» телами являются те, для которых значения критерия Био не превышают 0,25, а «массивными» телами – такие, для которых $Bi > 0,5$. Интервал значений $Bi = 0,25-0,5$ представляет переходную область, которую при точном расчете следует отнести к «массивным» телам, а при приближенном – к «тонким».

Так как критерий Био определяется не только размерами S или R и физическими свойствами тела λ , но и условиями теплопередачи $\alpha_{л+к}$, то одно и то же тело при нагреве в среде с низкой температурой (при малых значениях $\alpha_{л+к}$) может быть отнесено к «тонким», а при нагреве в среде с высокой температурой (при больших значениях $\alpha_{л+к}$) может оказаться «массивным» телом.

Продолжительность нагрева «тонких» заготовок при постоянной температуре печи можно определить по формуле

$$\tau = \frac{S_p c\rho}{K_\phi \alpha_{л+к}} \ln \frac{t_{печи} - t_M^H}{t_{печи} - t_M^K},$$

где S_p – расчетная толщина (радиус) заготовки;
 c – средняя теплоемкость металла;

ρ – плотность металла;

K_ϕ – коэффициент, зависящий от отношения объема тела к его поверхности (для пластины $K_\phi = 1$, для цилиндра $K_\phi = 2$, для шара $K_\phi = 3$);

$\alpha_{л+к}$ – коэффициент теплоотдачи;

$t_{\text{печи}}$ – температура печи;

t_M^H и t_M^K – начальная и конечная температура металла.

Продолжительность нагрева заготовок можно определить и по критериальной зависимости, которую можно выразить следующей формулой:

$$\frac{t_{\text{печи}} - t_M^K}{t_{\text{печи}} - t_M^H} = e^{-K_\phi \text{Bi Fo}}, \quad (7.1)$$

где Bi и Fo – критерии Био и Фурье.

Подставив в уравнение (7.1) выражение критерия Фурье

$$\text{Fo} = \frac{a\tau}{S_p^2}$$

и решив его относительно времени нагрева, получим

$$\tau = \frac{S_p^2 \ln\left(\frac{t_{\text{печи}} - t_M^H}{t_{\text{печи}} - t_M^K}\right)}{a \text{Bi}} \frac{1}{K_\phi}.$$

Имеются графики, построенные Д.В. Будриным, представляющие данную критериальную зависимость, т. е.

$$\Theta = \frac{t_{\text{печи}} - t_M^K}{t_{\text{печи}} - t_M^H} = f(\text{Bi}; \text{Fo}).$$

Эти графики часто используют для определения продолжительности нагрева заготовок.

Для определения продолжительности нагрева «массивных» тел пользуются формулой, выведенной из уравнения теплопроводности Фурье в предположении, что температура поверхности изменяется прямолинейно в зависимости от времени:

$$\tau = \frac{\Phi S_p^2}{a \Delta t_M} (t_M^k - t_M^n),$$

где Φ – коэффициент формы заготовки;

S_p – расчетная толщина заготовки;

a – температуропроводность металла;

t_M^n и t_M^k – начальная и конечная температура металла;

Δt_M – конечная разность температур поверхности и центра нагреваемой заготовки, определяемая по формуле

$$\Delta t_M = \left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M^k}{100} \right)^4 \right] \frac{1}{0,6} \frac{S_p}{\lambda}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $T_{\text{печи}}$ – температура печи;

S_p – расчетная толщина заготовки;

λ – коэффициент теплопроводности.

Для определения продолжительности нагрева в камерных печах с $t_{\text{печи}} = 1300$ °С заготовок толщиной свыше 100 мм с достаточной для практики точностью применяют формулу, предложенную Н.К. Доброхотовым:

$$\tau = \alpha_p K D \sqrt{D}, \text{ ч},$$

где α_p – коэффициент, учитывающий способ укладки заготовок на поду печи;

K – коэффициент, учитывающий химический состав и равный 10 для конструкционной углеродистой и низколегированной стали и 20 – для высокоуглеродистой и высоколегированной стали;

D – диаметр (толщина) заготовки, м.

Следует отметить, что расчет нагрева заготовок в печах с постоянной температурой можно вести по формулам для «тонких» тел (когда критерий Био не превышает 0,4) и по графикам Д.В. Будрина – когда критерий Био больше 0,4.

Материалы, инструмент, оборудование

1. Электрическая камерная печь, в которой поддерживается постоянная температура.
2. Нагреваемые заготовки (сталь Ст3, диаметр $D = 20; 40; 60; 100$ и 120 мм, высота $H = 100$ мм).
3. Термопары.
4. Приборы для измерения температуры (потенциометры, милливольтметр или пирометр).
5. Кузнечные клещи.

Термопары встроены в центре и на поверхности заготовки. Одна термопара введена в печь для измерения температуры печи.

Порядок выполнения работы

1. В нагретую до заданной температуры печь поместить заготовки.
2. При разности температур центра заготовки и температуры печи в $40\text{--}50$ °С измерения прекратить.
3. Построить кривые нагрева заготовок при заданной температуре рабочего пространства печи $t = f(\tau)$.
4. Вычислить критерий Био

$$Bi = \frac{\alpha_{л+к} R}{\lambda}.$$

Вычислить температурный критерий

$$\Theta = \frac{t_{\text{сп}} - t_{\text{мас}}}{t_{\text{сп}} - t_{\text{нач}}}.$$

Расчет вести по средней массе температуры заготовки.

6. По графикам Д.В. Будрина определить критерий Фурье

$$Fo = \frac{a\tau}{R^2}.$$

7. По полученным значениям критерия Фурье определить продолжительность нагрева заготовок.

8. Определить продолжительность нагрева заготовок по теоретическим формулам.

Данные опытов и результаты вычислений поместить в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Результаты обработки опытных данных

Материал и размеры заготовок	$t_{\text{печ}}$	$t_{\text{мас}}$	$\tau_{\text{оп, мин}}$	Vi	Θ	Fo	$\tau_{\text{крит}}$	$\tau_{\text{теор}}$
	°C						мин	

Содержание отчета

1. Краткое содержание и цель работы.
2. Таблица опытных данных, расчеты и графики, построенные по опытным данным.
3. Анализ полученных зависимостей.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1.	
Приборы для измерения высоких температур.....	3
Лабораторная работа № 2.	
Установление режима работы нагревательной печи с помощью электронного автоматического потенциометра....	13
Лабораторная работа № 3.	
Поверка термопар методом сличения.....	17
Лабораторная работа № 4.	
Передача тепла через стенки печи при стационарном режиме ее работы.....	25
Лабораторная работа № 5.	
Определение коэффициентов теплоотдачи при охлаждении металла.....	32
Лабораторная работа № 6.	
Нагрев твердых тел.....	40
Лабораторная работа № 7.	
Изучение процесса нагрева заготовок и деталей в камерных печах при постоянной температуре печи.....	50

Учебное издание

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Лабораторные работы (практикум)
для студентов специальностей

1-36 01 05 «Машины и технология обработки
материалов давлением»

и 1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении»

Составители:

ДАВИДОВИЧ Людмила Михайловна

ЛОГАЧЁВ Михаил Васильевич

ИВАНИЦКИЙ Николай Иванович

Редактор *Т. Н. Микулик*

Компьютерная верстка *А. Г. Занкевич*

Подписано в печать 14.05.2014. Формат 60×84 ¹/₈. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 3,37. Уч.-изд. л. 2,64. Тираж 200. Заказ 1296.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.