

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Энергетика и технология металлов»

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОПАРЫ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
по курсу «Электротехнические материалы»
для студентов специальности
140211(100400) «Электроснабжение»

Кафедра: «Энергетика и технология металлов»

Дисциплина: «Электротехнические материалы»

Составили: доцент, канд.техн.наук Т.А. Дудорова
доцент, канд.техн.наук В.И.Дудоров
инженер И.А.Семкина

Работа выполнена при равноценном участии авторов.

Составлены на основе экспериментальных исследований, проведенных А.Г.Юшковским.

Утверждены на заседании кафедры 3 марта 2005 г.

Рекомендовано методическим советом университета

«_____» _____ 2005г.

Цель работы

Исследовать зависимость термоЭДС термопары от ее температуры.

Общие сведения

Под термином «температура» имеют в виду величину, характеризующую степень нагретости вещества. Непосредственно можно лишь весьма приблизительно оценивать температуру тела (холодное, теплое, горячее, раскаленное), поэтому приходится прибегать к косвенным методам измерения температуры — к измерению таких физических свойств тел, которые однозначно связаны с их температурой и в то же время могут быть сравнительно просто и с большой точностью измерены. Для этой цели используют объемное или линейное расширение тел при нагревании (дилатометрические термометры — ртутные и манометрические), изменение их электрического сопротивления (электрические термометры сопротивления), изменение развиваемой ими (в паре с другим телом) термоэлектродвижущей силы (термопары), изменение количества излучаемой ими энергии (пирометры излучения).

В электрических печах для измерения температуры и в качестве датчиков для автоматического, управления температурным режимом применяют главным образом термоэлектрические термометры, а в высокотемпературных печах, особенно когда нужно измерить температуру жидкого металла, используют пирометры излучения.

Термоэлектрические термометры состоят из датчика (термоэлемента, термопары), измерителя термоЭДС и соединительных проводов.

В термоэлектрических термометрах для измерения температуры используется открытое в 1821 г. Зеебеком явление термоэлектричества (эффект Зеебека). Если два проводника из разных металлических материалов A и B соединены концами в замкнутый контур (рис. 1а) и места соединений находятся при разных температурах t_0 и t , то в контуре возникает электрический ток. Оба электропроводника, называемые термоэлектродами, образуют термопару. Одно из мест соединения, помещаемое в среду с измеряемой температурой, является рабочим кон-

цом термопары, второе, находящееся при постоянной известной температуре, является свободным концом термопары.

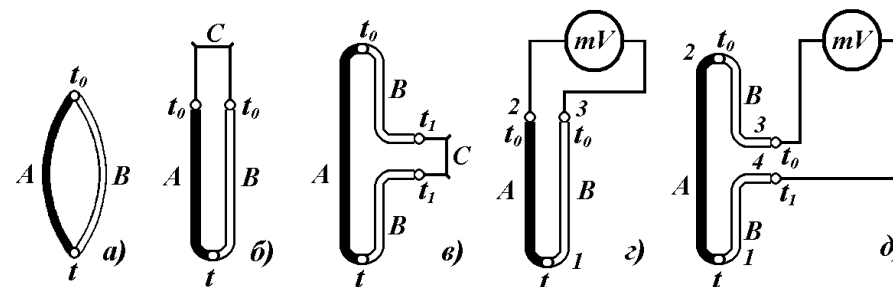


Рис.1. Схемы термоэлектрической цепи из двух(а) и трех (б,в) проводников; схемы включения электроизмерительного прибора в спай и термоэлектрод термоэлемента (з, д)

Значение термоЭДС зависит от материала обоих проводников и разности их температур. Если температуру одного из соединений t_0 поддерживать неизменной (например, как это принято, равной 0°C), то термоЭДС будет зависеть лишь от температуры второго соединения (второго спаея).

Если цепь из двух таких проводников разрезать (в любом месте, в том числе и в одном из спаев) и вставить в цепь третий проводник (C на рис. 1.б и в), то термо- ЭДС не изменится, если температуры обоих концов третьего проводника будут одинаковыми. Следовательно, можно в разрез цепи вставить электроизмерительный прибор (рис. 1з и д); требуется лишь, чтобы на концах ведущих к нему от термоэлемента проводников была одна и та же температура t_0 или t_1 — они должны присоединяться к термоэлектродам рядом.

Прибор будет измерять термоЭДС, а следовательно, и температуру t рабочего спаея. Из принципа действия термоэлектрического термометра следует, что:

1) способ изготовления рабочего конца термоэлемента (сварка, пайка, скрутка) не может влиять на развиваемую им термо-

ЭДС, если размеры рабочего конца таковы, что температура во всех его точках одинакова;

2) так как прибор в цепи термоэлемента измеряет не термоЭДС, а протекающий в этой цепи ток, то необходимо, чтобы сопротивление цепи в эксплуатации оставалось неизменным и равным его значению при градуировке. Но осуществить это практически невозможно ввиду того, что сопротивление термоэлектродов и соединительных проводов меняется с изменением окружающей температуры. Отсюда возникает одна из принципиальных погрешностей метода — погрешность от несоответствия сопротивления схемы ее сопротивлению при градуировке.

Для уменьшения этой погрешности приборы для тепловых измерений выполняются высокоомными (50—100 Ом при грубых измерениях, 200—500 Ом при более точных) и с малым температурным коэффициентом сопротивления. В настоящее время, как правило, применяются потенциометрические методы измерения термоЭДС;

3) термоэлектрические термометры градуируют всегда при определенной температуре свободного конца термоэлемента — при 0°C. Обычно в работе температура свободного конца отличается от градуировочной. В результате этого возникает вторая принципиальная погрешность метода — погрешность на температуру свободного конца термоэлемента. Так как эта погрешность может достигать десятков градусов, необходимо в показания прибора вносить соответствующую поправку. В современных приборах эта поправка вносится в их показания автоматически.

Известно, что при соприкосновении двух различных металлов между ними возникает разность потенциалов.

Причина контактной разности потенциалов заключается в различных значениях работы выхода электронов из металлов, а также в том, что свободных электронов, а следовательно, и давление электронного газа у разных металлов и сплавов может быть неодинаковым. Известно, что контактная разность потенциалов между металлами *A* и *B* равна:

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}},$$

где U_A и U_B — потенциалы соприкасающихся металлов;
 n_{0A} и n_{0B} — число электронов в единице объема металлов *A* и *B*;
 k — постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;
 e — заряд электрона.

Если температуры контактов одинаковы, то сумма разностей потенциалов в замкнутой цепи равна нулю. Когда же равенство температур не соблюдается, то между проводниками возникает термоЭДС.

Допустим, что один из спаев помещен в среду с измеряемой температурой T_1 (горячий спай), то милливольтметр, включенный в замкнутую цепь (рис.1), покажет значение (термоЭДС) пропорциональное разности температур. Значение термоЭДС горячего и холодного спаев также зависит от материала обоих проводников.

$$U = U_{AB} + U_{BA} = U_B - \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_0} + U_A - U_B \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}},$$

откуда

$$U = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} = C (T_1 - T_2),$$

где $C = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}$ — коэффициент,

характеризующий данную пару, мкВ/К.

Подбирая две проволоки, имеющие большую термоЭДС, изготавливают термопары, которые используют для измерения температур. В термопарах стремятся применять металлы и сплавы, имеющие большой и стабильный коэффициент термоЭДС.

Для изготовления термопар применяют сплавы:
Копель — 56% Cu и 44% Ni;
Алюмель — 95% Ni, остальное Al, Si и Mg;

Хромель - 90%Ni и 60%Cr и другие.

Любая пара проводящих разнородных материалов может быть использована для создания термоЭДС, однако лишь немногие из них применяются для изготовления термоэлектродов термопар. Эти материалы должны развивать высокую термоЭДС, значения которой должны быть по возможности приблизительно пропорциональны температуре. Материалы должны быть достаточно жаростойкими, чтобы длительно работать при рабочей температуре. Они должны также обладать в течение длительного времени неизменными физическими свойствами при нагреве до рабочей температуры, и их градуировка при этом не должна меняться.

Хорошо зарекомендовали себя и получили широкое распространение следующие термопары:

Платинородий-платиновая (ПП). Положительный электрод состоит из сплава платины «Экстра» (90%) и родия (10%), отрицательный электрод — из платины «Экстра». Ввиду дороговизны материала диаметр электродов обычно составляет 0,5 мм. Эти термометры могут быть применены для измерения температур длительно до 1300°C и кратковременно до 1600°C при использовании их в окислительной газовой среде. В этих условиях термопары зарекомендовали себя как очень надежные. В восстановительной атмосфере термоэлектроды ПП науглероживаются и быстро разрушаются. В вакууме при 1250°C начинается довольно интенсивное распыление платины, вследствие чего допустимая температура их применения в вакуумных печах ниже, чем в печах с окислительной атмосферой.

При технических измерениях эти термопары обычно используются при температуре выше 1000°C, так как при более низких температурах можно использовать более дешевые и удобные (с большей термоЭДС) термопары из других сплавов.

Хромель-алюмелевый (ХА) термоэлемент выполнен из специально разработанных сплавов хромеля и алюмеля и обладает сравнительно высокой термоЭДС и строго линейным характером ее изменения в функции от температуры. Он предназначен для длительного измерения температур до 1000 °C и кратковременного до 1300°C. В этих пределах он надежно работает в окислительной атмосфере; образу-

ющаяся на его поверхности пленка окислов защищает внутренние слои от окисления. Это наиболее распространенный термоэлемент.

Для измерения температуры в высокотемпературных реакторах, реактивных двигателях, ракетах и спутниках, а также для регулирования высокотемпературных печей, необходимы термопары с диапазоном рабочих температур выше 2000°C. Для этой цели пригодны такие тугоплавкие металлы, как вольфрам, молибден, рений и их сплавы.

Вольфраммолибденовые термопары при 2000°C развивают термоЭДС всего около 6мВ. При 1300°C изменяется знак термо-ЭДС. Так же ведут себя и термопары из вольфраммолибденовых сплавов. В инертных газах и в водороде эти термопары не корродируют. Воздействие углерода, углеродсодержащих газов и серы на молибден становится заметным при более низких температурах, чем их воздействие на вольфрам. Уже после нескольких нагревов до высокой температуры может произойти разрушение термоэлектродной проволоки.

Термопары из **вольфрамрениевого сплава** с высоким содержанием рения (до 26%) изготовить легче, чем из чистого вольфрама. Этот сплав менее склонен, чем вольфрам, к разрушению после нагрузки при высокой температуре в водороде или после сварки. Вольфрамрениевый сплав с 25% рения применяют в качестве отрицательного термоэлектрода. Положительным термоэлектродом служит чистый вольфрам или вольфрамрениевый сплав с небольшим содержанием рения, чтобы величина термоЭДС была достаточно большой. Эти сплавы после отжига при 1800°C становятся достаточно устойчивыми к разрушению благодаря введению в вольфрамовый порошок присадок калия, кремния или алюминия, которые испаряются при дальнейшей обработке сплава.

Термопары WRe3 – WRe25 хорошо работают в нейтральной и слабо восстановительной атмосфере и при циклическом изменении температуры. В окислительной атмосфере термопара разрушается, также как и в присутствии углерода и углеродсодержащих газов из-за образования карбидов вольфрама. Термопару могут разрушать и загрязнения из керамического защитного чехла. В тепловыделяющих элементах ядерных реакторов измерения проводят в защитном газе. термоЭДС этих термопар воспроизводится настолько хорошо, что

основные величины стандартизованы. Отклонения между 400°C и 2300°C не превышают $\pm 1\%$.

В некоторых случаях для изготовления термопар используют тугоплавкие неметаллические соединения (полупроводники).

Предварительная подготовка

С целью подготовки к работе по рекомендуемой литературе [1] следует изучить § 7.1, 7.5.

Объем исследований

Измерить термоЭДС термопары в интервале температур одного из режимов:

А – (100 ÷ 300)°C; Б – (200 ÷ 400)°C; В – (300 ÷ 500)°C. Номер термопары и режим задаются преподавателем.

Оборудование и приборы

Лабораторная установка содержит (рис.2) нагревательную печь **1** с расположенными в ней термопарами **2**, понижающий трансформатор (220/24В) **3**, электронный потенциометр(ЭП) **4** для измерения температуры в печи, измерительный прибор (ИП) **5** для измерения напряжения термопары и термометр для измерения температуры холодного спая термопары. Нагревательная печь состоит из металлического корпуса **7**, установленного при помощи ножек **8** на площадке **9**, трубки из кварцевого стекла **10**, вокруг которой расположен нагреватель **11**, выполненный из нихромовой проволоки, выводы которого идут на наружные клеммы **12** через отверстия с изолирующими втулками. Пространство между нагревателем и корпусом заполнено теплоизолирующим материалом **13**. Проводники термопар расположены в изолирующих трубках **14**. Трансформатор **3** закреплен на площадке печи **9**, его вторичная обмотка подключена к клеммам нагревателя **12**, а первичная обмотка через предохранитель **F** (1,0А) и выключатель **S** (сеть 220В) подключена к штепсельной вилке **15**. К вторичной обмотке трансформатора **3** через диод **VD** и добавочный резистор **R** подключен светодиод **HL** для

контроля наличия напряжения на нагревателе **11**. Выводы контрольной термопары подключены к клеммам "+" и "-" (КЭП), выводы исследуемых термопар подключены к клемме "-" общий и к "+" клеммам термопар №1, №2, №3, №4.

Электронный потенциометр(ЭП) **4** содержит выводы "+" и "-" для подключения к измерительной термопаре и шнур с вилкой **16** для подключения к сети 220В. Выключатель сети находится внутри прибора, а тумблер на его лицевой панели.

Измерительный прибор содержит клеммы для подключения измеряемого напряжения термопары и шнур с вилкой **17** для подключения к сети 220В.

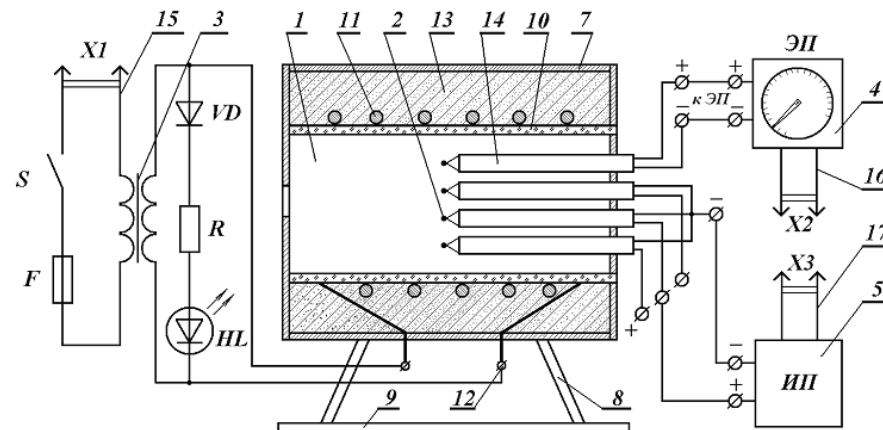


Рис.2. Схема лабораторной установки для исследования температурной характеристики термопары.

Порядок проведения работы

1. Изучить схему (рис.2).
2. Подключить вход измерительного прибора к клеммам заданной термопары, соблюдая полярность.

3. Включить в сеть 220В вилки ЭП, ИП и нагревательной печи. Включить выключатели "Сеть" ЭП и нагревательной печи.
4. В процессе нагревания печи при достижении температуры начального значения заданного режима зафиксировать одновременно значения температуры ($t, ^\circ\text{C}$) и напряжения термопары ($U_{\text{наг.}}$). Измерения $t, ^\circ\text{C}$ и $U_{\text{наг.}}$ выполнять одновременно через каждые 40°C до достижения температуры верхнего значения заданного режима.
5. Выключить нагреватель печи и по мере ее охлаждения выполнить измерения $t, ^\circ\text{C}$ и $U_{\text{охл.}}$ через каждые 40°C до достижения температуры нижнего значения заданного режима. Данные измерений занести в таблицу 1.
6. Отключить ЭП, ИП и нагревательную печь от сети 220В.

Таблица 1

Результаты измерений

$t, ^\circ\text{C}_{\text{окр.среды}} =$		$\Delta U, \text{мВ} =$			
$t, ^\circ\text{C}$					
$U_{\text{наг.}} \text{ мВ}$					
$U_{\text{охл.}} \text{ мВ}$					
$U_{\text{п.наг.}} \text{ мВ}$					
$U_{\text{п.охл.}} \text{ мВ}$					

Обработка результатов

1. По таблицам 2 и 3 определить, для какого типа термопары подходит полученная характеристика;
2. С помощью термометра измерить температуру окружающей среды (т.е. холодного спаея);
3. Найти поправку ΔU , т.е. величину термоЭДС для термопары типа хромель-алюмель по таблице 2 или для термопары типа вольфрам-рений по таблице 3 (таблицы выполнены для температуры окружающей среды 0°C);
4. К величине термоЭДС, измеренной при определенной температуре (табл.1), прибавить поправку ΔU и получить величину

$$U_{\text{п}} = U + \Delta U \text{ и занести ее в эту же таблицу;}$$

5. Построить опытные температурные характеристики $U_{\text{п.наг.}} = f(T^\circ)$, $U_{\text{п.охл.}} = f(T^\circ)$ и табличную на одном графике и сравнить их.
6. Найти постоянный коэффициент ψ для данной пары проводников, исходя из формулы

$$U = \psi \cdot (T_1 - T_2),$$

где U – измеренное на термопаре напряжение для температуры T_1 ;
 T_1 – температура, до которой нагрели термопару;
 T_2 – температура окружающей среды.

7. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Каковы причины появления контактной разности потенциалов на спае двух разнородных металлических проводников?
2. Будет ли циркулировать ток в замкнутом контуре из разных металлических проводников, если температуры спаев T_1 и T_2 равны?
3. Что такое термопара?
4. Какие сплавы применяются для термопар?
5. Что такое коэффициент термоЭДС? Каков он для проводников, используемых для термопар?
6. Какие температуры можно измерять с помощью различных термопар?
7. Какая термопара развивает наибольшую термоЭДС при данной разнице температур?
8. Почему для термоэлектрических генераторов используются некоторые полупроводниковые материалы?
9. Как объяснить различия в характеристиках $U_{\text{п.наг.}} = f(T^\circ)$, $U_{\text{п.охл.}} = f(T^\circ)$ и табличной $U = f(T^\circ)$?

Литература

1. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 304с.

молибдена-силицид вольфрама; **ТГБЦ-350М** – графит-борид циркония; **ТГКТ 360М** – графит-карбид титана; **ВР-5/20** – вольфрам-рений.

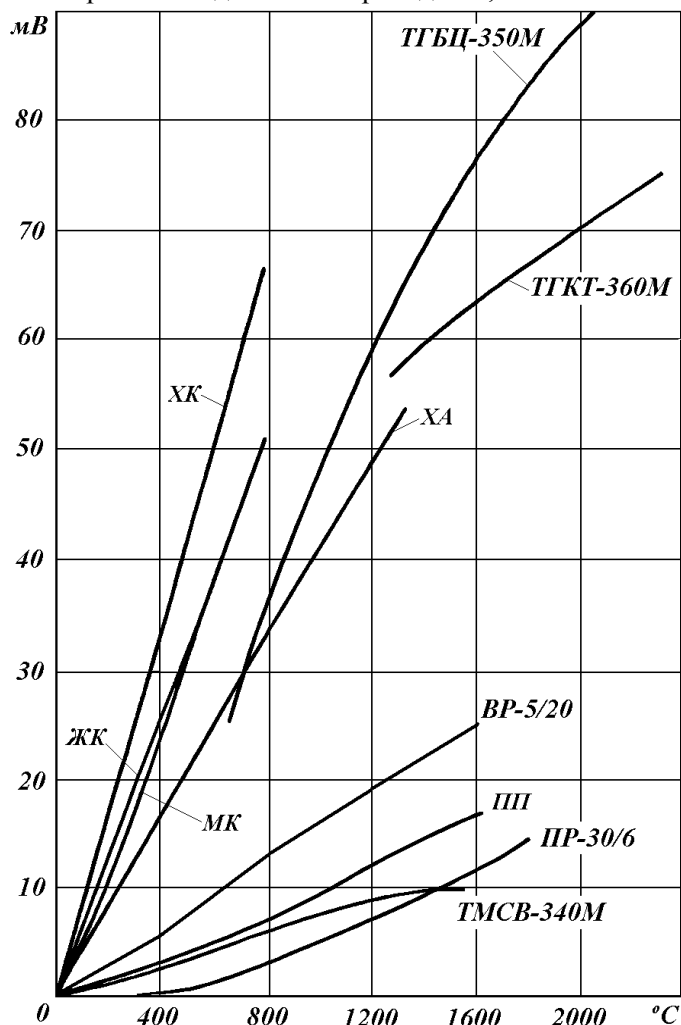


Рис.3. Кривые зависимости термо-ЭДС от температуры для наиболее распространенных термоэлементов.

ХА – хромель-алюмель; **ХК** – хромель-копель; **ЖК** – железо-копель; **МК** – медь-копель; **ПП** – платинородий-платина; **ПР-30/6** – платинородий- платинородий; **ТМСВ-340М** – силицид

Дудорова Татьяна Александровна
Дудоров Владимир Иванович
Семкина Ирина Анатольевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОПАРЫ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
по курсу «Электротехнические материалы»
для студентов специальности
140211(100400) «Электроснабжение»

Редактор Н.М. Кокина

Подписано к печати
Печать трафаретная
Заказ

Формат 60x84 1/16
Усл.печ.л. 1,0
Тираж 50

Бумага тип. № 1
Уч.-изд. л. 1,0
Цена свободная

Редакционно-издательский центр КГУ.
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.
Курганский государственный университет.

