

Термопары

Типы, характеристики,
конструкции, производство

Термопара (термоэлектрический преобразователь) — устройство, применяемое в промышленности, научных исследованиях, медицине, в системах автоматики. Основное назначение термопар — измерение температуры.

СОДЕРЖАНИЕ

Николай Никонов

Термопары. Типы, характеристики, конструкции, производство / Никонов Н.В. – М.: ООО «МТК «МЕТОТЕХНИКА», 2015. – 62 с.: 4 ил., 31 табл.

Схемы и рисунки Горелика Никиты

В статье «Термопары. Типы, характеристики, конструкции, производство» подробно рассматриваются термопары. Описаны принцип работы, особенности конструкций и производства. Большое внимание уделяется типам термопар. В статье приведены самые распространенные в промышленности типы термопар и их характеристики. Дано описание и свойства материалов, из которых производят термоэлектроды и удлиняющие провода. Также описаны принципы подбора пары и градуировки. Авторы надеются, что приведенный в статье материал будет интересен и полезен читателям.

© Никонов Н.В., статья «Термопары. Типы, характеристики, конструкции, производство», 2015
© ООО «МТК «МЕТОТЕХНИКА», оформление, 2015

Введение	→	4
Глава 1 Устройство термопары	→	6
1.1 Принцип работы термопары. Эффект Зеебека	→	6
1.2 Термоэлектрический термометр. Конструкции термопар	→	7
1.3 Удлиняющие (компенсационные) провода для термопар	→	10
1.4 Основные источники погрешностей измерений с помощью термопар	→	12
Глава 2 Типы термопар и их параметры	→	14
2.1 Термопара хромель-алюмель (ТХА)	→	14
2.2 Термопара хромель-копель (ТХК)	→	16
2.3 Термопара железо-константан (ТЖК)	→	18
2.4 Термопара вольфрам-рений (ТВР)	→	19
2.5 Термопара вольфрам-молибден (ВМ)	→	22
2.6 Термопары платинородий-платина (ТПП)	→	24
2.7 Термопары платинородий-платинародий (ТПР)	→	27
2.8 Сводная таблица типов термопар	→	30
Глава 3 Материалы для термопар	→	31
3.1 Требования, предъявляемые к термоэлектродным сплавам	→	31
3.2 Никелевые и медно-никелевые сплавы	→	32
3.3 Тугоплавкие металлы и сплавы	→	40
3.4 Благородные металлы и сплавы	→	46
Глава 4 Производство термопар	→	50
4.1 Производство термоэлектродной проволоки	→	50
4.2 Подбор пары	→	52
4.3 Градуировка и поверка термопар	→	52
Заключение	→	57
Список литературы	→	58

Термопара (термоэлектрический преобразователь) — устройство, применяемое для измерения температуры в промышленности, научных исследованиях, медицине, в системах автоматики.

Основное назначение термопар – измерение температуры. Температура — физическая величина, количественно характеризующая меру средней кинетической энергии теплового движения молекул какого-либо тела или вещества. Из анализа определения температуры можно сделать вывод, что данная физическая величина не может быть измерена непосредственно. Судить об изменении температуры какого-либо объекта можно по изменению других физических свойств данного объекта (например, объема, давления, электрического сопротивления, тер-

мо-ЭДС, интенсивности излучения и др.).

Для обеспечения единства измерений температуры в качестве международного стандарта в 1968 году была принята Международная Практическая Температурная Шкала МПТШ-68 (в настоящее время стандартом является уточненная в 1990 году версия шкалы - ITS-90 (МТШ -90), использующая в качестве опорных (реперных) точек температуры изменения агрегатного состояния определенных веществ, которые могут быть воспроизведены. Помимо этого, стандарт определяет типы эталонных средств измерения во всем диапазоне температур. Перечень некоторых реперных точек МТШ-90 приведен в таблице Таблица 1.

Таблица 1. Краткий перечень реперных точек МТШ-90

Реперная точка	Температура, К	Температура, °С
Точка затвердевания золота	1337,33	1064,18
Точка затвердевания серебра	1234,93	961,78
Точка затвердевания цинка	692,677	419,527
Тройная точка воды	273,16	0,01
Тройная точка кислорода	54,3584	-218,7916
Точка плавления галлия	302,9146	29,7646

В зависимости от диапазона измеряемых температур различают две основные группы методов измерения: контактные (собственно термометрия) и бесконтактные (пирометрия или термометрия излучения). Бесконтактные способы применяются, как правило, для измерения очень высоких температур. Измерение температуры с помощью термопар относится к контактному способу измерения.

Принцип действия термопары основан на термоэлектрическом эффекте или эффекте Зеебека. К достоинствам термопар, как средств измерения температуры, можно отнести высокую точность измерения значений температуры, большой температурный диапазон измерения, их простоту устройства и надежность.

Термопары классифицируются по материалам, из которых они изготовлены, а также по классу точности (допуска) ([см. Глава 4.3](#)).

1.1. Принцип работы термопары. Эффект Зеебека

Принцип работы термопары основан на термоэлектрическом эффекте. Явление термоэлектричества было открыто немецким физиком Т. Зеебеком (T. Seebeck) в 1821 г. и также получило название эффект Зеебека.

Эффект Зеебека состоит в следующем: если соединить два проводника (термоэлектрода) из разнородных металлов или сплавов таким образом, чтобы они образовали замкнутую электрическую цепь (Рисунок 1), и затем поддерживать места контактов (спаи) при различной температуре, то в цепи будет протекать постоянный ток. Цепь, которая состоит только из двух различных проводников (термоэлектродов), называется термоэлементом или термопарой.

Электродвижущая сила, вызывающая ток в цепи, называется термо-ЭДС Зеебека и в первом приближении зависит только от материала термоэлектродов и разности температур спаев.

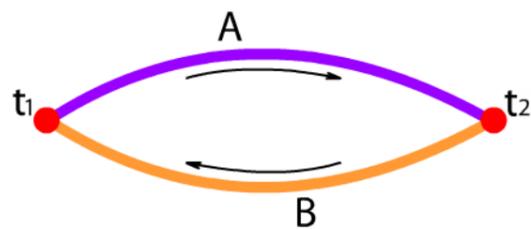


Рисунок 1. Схема термопары, где

$t_1 > t_2$. А – положительный термоэлектрод, В – отрицательный термоэлектрод. Спаи с температурой t_1 – горячий спай (рабочий конец), с температурой t_2 – холодный спай (свободный конец). Стрелками показано направление тока.

$$E = \alpha (T_2 - T_1),$$

E – термо-ЭДС,

α — коэффициент термо-ЭДС (коэффициент Зеебека),

T_1 – температура горячего спае,

T_2 – температура холодного спае.

В простейшем случае коэффициент термо-ЭДС определяется только материалами проводников, однако, в общем случае он зависит и от температуры, и иногда с изменением температуры α меняет знак.

Термоэлектрод, по которому ток идет от горячего спае к холодному, договорились считать положительным, от холодного к горячему – отрицательным. При обозначении термопары, например ТХА (термопара хромель-алюмель), на первом месте в названии указывается материал положительного электрода, на втором – отрицательного.

Таким образом, зная температуру одного спае (обычно ее поддерживают постоянной, например, равной 0 °С) и измеряя ток или напряжение в цепи, можно однозначно определить неизвестную температуру другого спае.

Стоит заметить, что величина термо-ЭДС составляет милливольты при разности температур в 100 К (173,15 °С) и температуре холодного спае в 0 °С (например, пара медь-константан дает 4,25 мВ, платина-платинородий — 0,643 мВ).

1.2. Термоэлектрический термометр. Конструкции

Правильнее говорить, что температуру измеряют не с помощью термопары, а с помощью термоэлектрического термометра. Чувствительным элементов такого термометра является термопара; термометрической величиной¹ – термо-ЭДС, возникающая в термопаре; термометрическим свойством² – изменение термо-ЭДС с изменением температуры;

Основными факторами, от которых зависит конструкция термопары, являются условия ее эксплуатации. При конструировании того или иного термоэлектрического преобразователя учитываются такие факторы, как агрегатное состояние вещества, температуру которого требуется измерять, «агрессивность» внешней среды, диапазон измеряемых температур, тепловая инерционность³ и другие.

Можно выделить следующие особенности конструкции термопар:

1. Концы двух термоэлектродов соединяются между собой в одной точке, образуя рабочий спай. Соединение происходит, как правило, с помощью

электродуговой сварки, а термоэлектроды перед сваркой скручивают между собой. В специальных случаях вместо сварки может применяться пайка. Термоэлектроды из тугоплавких металлов, например, в вольфрам-ренийевых или вольфрам-молибденовых термопарах, часто соединяют только скруткой без дальнейшей сварки.

2. Термоэлектроды должны быть соединены между собой только в рабочем спае. По всей остальной длине требуется их электрическая изоляция друг от друга.

3. Способ изоляции термоэлектродов зависит от верхнего температурного предела применения термоэлектрического термометра. Если указанный предел не превышает 100-120 °С, то может применяться любая изоляция, в том числе воздушная. При температурах до 1300 °С изоляцию выполняют с помощью фарфоровых одно- и двухканальных трубок или бус. При более высоких температурах электроизоляционные свойства

1 Термометрическая величина

физическая величина, значение которой непосредственно измеряется в процессе измерения температуры для дальнейшего определения по нему значения температуры. Примерами термометрической величины являются

термо-ЭДС (в термоэлектрических термометрах), длина ртутного столба (в ртутных термометрах), а также другие физические величины в термометрах различных типов.

2 Термометрическое свойство

свойство, благодаря которому с изменением значения температуры происходит изменение значения термометрической величины.

пирометрического фарфора сильно ухудшаются, а сам он размягчается. В связи с этим при более высоких температурах используют трубки из окиси алюминия (до 1950 °С) и из окиси магния, окиси бериллия, двуокиси тория и двуокиси циркония (выше 2000 °С).

4. В зависимости от среды, в которой осуществляется измерение температуры, термопара может иметь наружную защитную трубку-чехол с закрытым концом. Данная трубка может быть металлической, керамической или металлокерамической. Она должна обеспечивать механическую стойкость термоэлектрического термометра, отсутствие механического напряжения термоэлектродов, гидроизоляцию, а в некоторых случаях герметичность термометра. Материал защитной трубки-чехла должен выдерживать длительное пребывание при температуре верхнего предела применения данной конструкции термопары, а также быть химически стойким к среде, в которой осуществляются измерения, обладать хоро-

3 Тепловая инерционность термопары

свойство, определяющее, как быстро термопара реагирует на изменение температуры среды, в которой осуществляются измерения. Характеризуется постоянной времени. Различают малоинерционные термопары, средней

шей теплопроводностью. Защитная трубка-чехол должна быть газонепроницаемой и нечувствительной к действию резких изменений температуры.

На рисунке Рисунок 2 представлен один из вариантов конструктивного исполнения термопары.

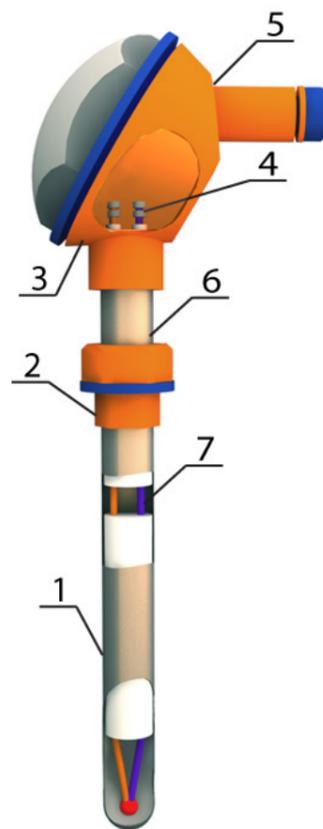


Рисунок 2. Конструктивная схема термоэлектрического термометра, где

1 – защитная гильза, 2 – неподвижный штуцер (существуют варианты исполнения с передвижным штуцером), 3 – головка, 4 – розетка из изоляционного материала с зажимами для присоединения термоэлектродов и удлиняющих проводов, 5 – патрубок с сальниковым уплотнением, 6 – соединительная трубка, 7 – термоэлектроды.

Классификация типов конструктивного исполнения термопар

По назначению и условиям эксплуатации:

- погружаемые;
- поверхностные.

По наличию и материалу защитного чехла:

- изготавливаемые без чехла;
- со стальным чехлом (до $t \approx 600$ °С);
- с чехлом из специального жаростойкого сплава (до $t \approx 1000-1100$ °С);
- с фарфоровым чехлом (до $t \approx 1300$ °С);
- с чехлом из тугоплавких сплавов ($t \approx 2000$ °С и более).

По конструкции крепления термопары на месте установки:

- с неподвижным штуцером;
- с подвижным штуцером;
- с подвижным фланцем.

По защищенности от внешней среды со стороны выводов:

- с обыкновенной головкой;
- с водозащищенной головкой;
- со специальной заделкой выводных концов (без головки).

По защищенности от измеряемой среды:

- защищенные от воздействия неагрессивных и агрессивных сред;
- незащищенные (применяются, когда измеряемая среда не оказывает вредного влияния на термоэлектроды).

По герметичности, рассчитанные на высокое давление измеряемой среды:

- негерметичные;
- герметичные, предназначенные для работы при различных условных давлениях и температурах.

По устойчивости к механическим воздействиям:

- вибротрясоустойчивые;
- ударопрочные;
- обыкновенные.

По числу зон, в которых должна контролироваться температура:

- однозонные;
- многозонные.

По степени тепловой инерции:

- с большой инерционностью – до 3,5 минут;
- со средней инерционностью – до 1 минуты;
- малоинерционные – до 40 секунд;
- с ненормированной инерционностью.

Длина рабочей части термопары может быть различной: от 120 до 1580 мм для однозонных термоэлектрических преобразователей, до 20000 мм – для многозонных.

1.3. Удлиняющие (компенсационные) провода для термопар

Согласно принципу работы термопары, описанному в [Глава 1.1](#), свободные концы термопары (холодный спай) должны находиться при постоянной температуре, желательно близкой к 0 °С. К этим концам присоединяют соединительные провода, которые идут к измерительному прибору. Если располагать свободные концы в головке термоэлектрического термометра (см. Рисунок 2), то выполнить данное условие практически невозможно. Головка термометра может находиться при очень высоких температурах, а также эти температуры могут меняться из-за изменения состояния среды, в которой осуществляются измерения. Также не всегда возможно разместить измерительный прибор в непосредственной близости от термопары. Таким образом, возникает необходимость в удалении точек подключения измерительного прибора (свободных концов термопары) от непосредственного места измерения температуры. Данную задачу решают с помощью компенсационных (удлиняющих) проводов.

В простейшем случае компенсационные провода могут быть изготовлены из тех же сплавов, что и термоэлектроды. Но, как правило, провода, выводимые из головки термометра, будут находиться при температурах гораздо более низких, чем термоэлектроды. Этот факт позволяет заменить дорогостоящие термоэлектродные сплавы со специальными свойствами на более дешевые сплавы. Необходимо толь-

ко обеспечить условия, исключающие возможность образования паразитных (наведенных) термо-ЭДС. О данных условиях будет рассказано далее.

Схема термоэлектрической цепи, которая получается при наличии удлиняющих проводов, представлена на рисунке Рисунок 3.

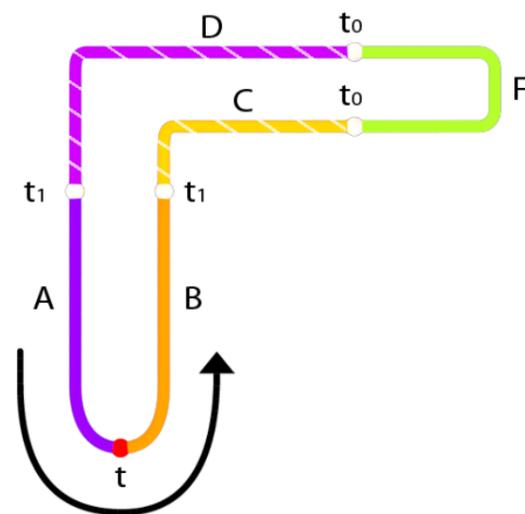


Рисунок 3. Схема включения удлиняющих проводов в цепь термопары, где

А, В – основные термоэлектроды; С, D – компенсационные (удлиняющие) провода; F – соединительные провода, с помощью которых подключается измерительный прибор.

Во избежание образования паразитных термо-ЭДС необходимо, чтобы провода С и D при температурах T_1 и T_0 развивали такую же термо-ЭДС, что и термоэлектроды А и В при тех же температурах:

$$E_{AB}(T_1; T_0) = E_{CD}(T_1; T_0).$$

Проведя некоторые математические преобразования и учитывая условие $E_{AB}(T_1; T_0) = E_{CD}(T_1; T_0)$ получим соотношение [5]:

$$E_{ABCFD}(T; T_1; T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0).$$

Таким образом, если выдержать условие, при котором термо-ЭДС, развиваемая проводами С и D при температурах T_1 , T_0 , равна термо-ЭДС, развиваемой проводами А и В при тех же температурах, то в цепи не будет образовываться каких-либо паразитных термо-ЭДС по сравнению с элементарной цепью, состоящей из двух термоэлектродов А и В.

Провода, удовлетворяющие условию $E_{AB}(T_1; T_0) = E_{CD}(T_1; T_0)$, называются удлиняющими (компенсационными). Такие провода, соединенные с термоэлектродными и соединительными проводами, развивают при небольших температурах (не более 100-150 °С) термо-ЭДС, равную термо-ЭДС термопары. Основное назначение компенсационных проводов – отведение свободных концов термопары в зону с известной и постоянной температурой.

В качестве примера можно рассмотреть термопару платинородий-платина (ТПП). Для данной термопары в качестве удлиняющих используются провода, изготовленные из меди и медно-никелевого сплава (0,6% Ni + 99,4% Cu). При $T_1 = 100$ °С и $T_0 = 0$ °С

они развивают такую же термо-ЭДС, как и платинородий с платиной – 0,64 мВ. В данном случае применение удлиняющих проводов позволит использовать меньшее количество дорогостоящих платинородия и платины.

Конструкция компенсационных проводов представлена на рисунке Рисунок 4.

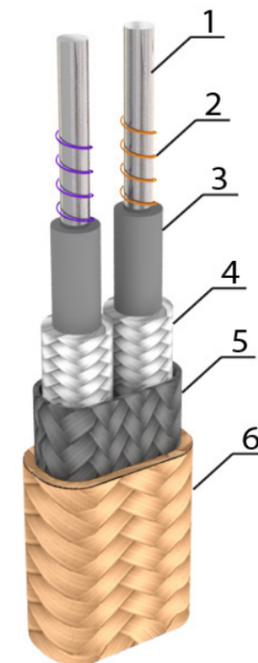


Рисунок 4 Конструкция удлиняющих проводов типа КПП, где

1 – жила; 2 – цветная хлопчатобумажная опознавательная нить; 3 – резиновая изоляция; 4 – хлопчатобумажная оплетка; 5 – хлопчатобумажная оплетка, пропитанная противогнилостным составом; 6 – внешняя оплетка из стальной или медной проволоки.

1.4. Основные источники погрешностей измерений с помощью термопар

Любое измерение выполняется с той или иной точностью. Точность измерения зависит от метода, внешних условий, состояния средств измерения и некоторых других факторов. Далее приводятся основные источники погрешностей измерений температуры с помощью термопар.

1. Изменение термо-ЭДС в процессе работы термопары. Данное явление получило название термоэлектрической нестабильности термоэлектродных сплавов. Установлено, что в процессе эксплуатации все термоэлектродные сплавы изменяют свою термо-ЭДС, что приводит к изменению показаний термопар. При относительно низких температурах или при кратковременной эксплуатации изменения термо-ЭДС могут быть незначительными и не увеличивать погрешность измерений. При высоких температурах или длительной эксплуатации термопар нестабильность может достигать больших значений, что приводит к существенному снижению точности измерений. Основными причинами, вызывающими термоэлектрическую нестабильность, являются: взаимодействие термоэлектродов с окружающей средой; взаимодействие электродов с изолирующими и защитными материалами; взаимодействие термоэлектродов друг с другом; внутренние процессы, протекающие в термоэлектродных

сплавах при изменении температуры, воздействии радиации, электромагнитных полей, высокого давления.

2. На точность измерений может оказывать влияние сопротивление изоляции термоэлектродов. Под влиянием высоких температур может понизиться электрическое сопротивление изоляции термоэлектродов, что, в свою очередь, может привести к существенному искажению показаний термопары.

3. К возникновению погрешностей измерений может привести неправильный выбор измерительного прибора. При уменьшении диаметра термоэлектродов возрастает удельное сопротивление (сопротивление на единицу длины) цепи. Такой же эффект наблюдается и при повышении температуры. Если входное сопротивление измерительного прибора не соответствует сопротивлению подключенной цепи, то могут возникнуть большие погрешности измерений.

4. Причиной возникновения погрешностей может стать изменение температуры свободных концов термопары. Эта температура может изменяться в процессе измерения либо может отличаться от температуры свободных концов во время градуировки термопары.

5. Погрешность измерения может возникнуть из-за того, что электроды термопары имеют различные значения термо-ЭДС вдоль своей длины. Данное явление называется термоэлектрической неоднородностью термоэлектродных сплавов и возникает из-за неоднородности физических свойств металлов и сплавов, из которых изготовлены электроды термопары. Неоднородность физических свойств обусловлена колебаниями состава и структуры материалов. Причинами таких колебаний могут быть радиоактивное облучение, механическое или электромагнитное воздействие на непосредственно электроды или заготовки, из которых они изготовлены, химические реакции, протекающие в процессе изготовления или эксплуатации электродов термопары.

6. Погрешности в определении градуировочной характеристики эталонных термопар.

7. Отклонение градуировочной характеристики термопар от стандартной градуировочной таблицы.

2.1. Термопара хромель-алюмель (ТХА)

Основные свойства и области применения

Одна из самых распространенных термопар, применяемых в промышленности и научных исследованиях. Позволяет длительно измерять температуры до 1100 °С и кратковременно – до 1300 °С. Также используется для измерения низких температур вплоть до -200 °С (70К). Термопара хромель-алюмель предназначена для работы в инертных и окислительных средах, может использоваться для измерений в сухом водороде и кратковременно в вакууме. Термоэлектрическая характеристика данной термопары практически линейная, чувствительность составляет порядка 40 мкВ/°С. Термопара хромель-алюмель является наиболее устойчивой среди термопар других типов в условиях реакторного облучения.

К недостаткам данной термопары можно отнести высокую чувствительность к деформации термоэлектродов и обратимую нестабильность термо-ЭДС.

Термопара ХА производится в соответствии с [ГОСТ 3044-84](#), термоэлектродная проволока для данной термопары – [ГОСТ 1790-77](#) и рядом технических условий.

Данная термопара применяется для измерения температуры в промышленных печах, нагревательных устройствах, энергосиловом оборудовании, а также в многообразной научной апаратуре и лабораторных приборах.

паратуре и лабораторных приборах.

Материал термоэлектродов

В термопаре ХА положительным электродом является проволока из никелевого сплава хромель НХ 9,5 ([ГОСТ 492-2006](#)), отрицательным – проволока из никелевого сплава алюмель НМцАК 2-2-1 ([ГОСТ 492-2006](#)).

Рекомендуемая рабочая среда

Термопара хромель-алюмель предназначена для измерения температуры в окислительных и инертных средах. Содержание кислорода (O₂) в окислительной среде должно быть не менее 2-3% или его присутствие должно быть практически исключено. В противном случае в хромеле резко увеличивается селективное окисление хрома, его концентрация уменьшается, что приводит к существенному изменению уменьшению термо-ЭДС данного сплава. Термопара ХА может применяться и в восстановительной или переменной окислительно-восстановительной атмосфере, если имеет надежный защитный чехол ([см. Глава 1.2](#)).

Удлиняющие провода

Таблица 2. Удлиняющие провода к термопаре хромель-алюмель

Электрод термопары	Сплавы для удлиняющих проводов	Характеристика проводов
Хромель	Медь марки ММ по ГОСТ 2112-71	Суммарная компенсация до 100 °С с погрешностью ±0,15 мВ. Проволока из меди изготавливается по ГОСТ 2112-71, из константана – по ГОСТ 1791-67 . Провода изготавливаются по ГОСТ 5.1236-72
Алюмель	Константан марки МНМц 40-1,5 по ГОСТ 492-2006	
Хромель	Меднотитановый сплав марки МТ	Суммарная компенсация до 300 °С с погрешностью ±0,15 мВ. Проволока из сплавов МТ и НМ изготавливается по техническим условиям
Алюмель	Никельмедный сплав НМ	
Хромель	Хромель Т по ГОСТ 492-2006	Поэлектродная компенсация до 500 °С с погрешностью ±0,16 мВ. Проволока для удлиняющих проводов изготавливается по техническим условиям
Алюмель	Алюмель по ГОСТ 492-2006	
Хромель	Железо	Суммарная компенсация до 200 °С
Алюмель	Медно-никелевый сплав (Cu + 18% Ni)	

Изоляция и защита

В качестве изоляционных материалов для термопары хромель-алюмель могут быть использованы: фарфор, асбест, стекловолокно, кварц, эмали, высокоогнеупорные окислы.

Рекомендации по эксплуатации

Наиболее частыми причинами выхода термопары хромель-алюмель из строя являются:

- разрушение термоэлектрода из алюмеля вследствие его интеркристаллитной коррозии и охрупчивания;
- разрушение термоэлектрода из хромеля вследствие его коррозии (коррозия типа «зеленой гнили»).

2.2. Термопара хромель-копель (ТХК)

Интеркристаллитная коррозия и охрупчивание сплава алюмель происходит в результате нагрева термоэлектрода до температуры 650–820 °С в атмосфере, содержащей серу. Источниками появления серы могут являться: топливо печей, остатки масел и эмульсий в защитных чехлах термопары, некоторые сорта асбеста, цемента и других материалов, из которых могут быть изготовлены защитные чехлы. Предотвратить интеркристаллитную коррозию алюмеля можно, только полностью исключив попадание серы в атмосферу, окружающую термоэлектроды.

Коррозия сплава хромель может быть вызвана селективным внутренним окислением хрома (входит в состав данного сплава) вследствие работы термоэлектрода в атмосфере, содержащей пары воды или СО (слабоокислительная атмосфера). Предотвратить коррозию хромеля можно путем применения вентилируемых защитных чехлов большого диаметра или чехлов с помещенными внутри геттерами⁴.

4 Геттер

газопоглотитель, вещество, поглощающее и прочно удерживающее газы (кроме инертных), часто используются в устройствах для газопоглощения.

Основные свойства и области применения

Одна из самых распространенных термопар, применяемых в промышленности и научных исследованиях. Термопара хромель-копель позволяет проводить измерения температуры в инертных и окислительных средах до 800 °С длительно и до 1100 °С кратковременно. Нижний предел измеряемых температур ограничен -253 °С. В связи с наличием в промышленности термопары хромель-алюмель термопара хромель-копель применяется, как правило, для длительных измерений до 600 °С. Термопары данного типа обладают наибольшей чувствительностью из всех промышленных термопар. Чувствительность термопары ХК превышает 81 мкВ/°С при температурах выше 200 °С. Также данная термопара имеет практически линейную градуировочную характеристику. ТХК свойственна исключительно высокая термоэлектрическая стабильность при температурах до 600 °С. К недостаткам термопар данного типа можно отнести высокую чувствительность к деформации термоэлектрода.

Градуировка термопар хромель-копель осуществляется по градуировочным таблицам в соответствии с [ГОСТ 3044-84](#). Проволока для термоэлектродов поставляется по [ГОСТ 1790-77](#) и ряду технических условий.

Термопары хромель-копель широко распространены в различных областях промышленности и при проведении научных исследований; часто используются для измерения малых разностей температур.

Материал термоэлектродов

В термопаре ХК положительным электродом является проволока из никелевого сплава хромель НХ 9,5 ([ГОСТ 492-2006](#)), отрицательным – проволока из медно-никелевого сплава копель МНМц 43-0,5 ([ГОСТ 492-2006](#)).

Рекомендуемая рабочая среда

Основной рабочей средой термопары ХК является окислительная среда или содержащая инертные газы. Термопара также может использоваться

в вакууме при высокой температуре, но непродолжительное время. Постоянное использование термопары хромель-копель в указанной среде может привести к селективному испарению хрома из положительного электрода.

Для использования данной термопары в атмосфере, содержащей серу, в восстановительной, переменной окислительно-восстановительной, а также в слабоокислой атмосфере требуется хорошая (газоплотная) защита. В атмосфере, содержащей хлор или фтор, термопара хромель-копель может работать при температурах до 200 °С.

Удлиняющие провода

Таблица 3. Удлиняющие провода к термопаре хромель-копель

Электрод термопары	Сплавы для удлиняющих проводов	Характеристика проводов
Хромель	Хромель К по ГОСТ 492-2006	Поэлектродная компенсация до 100 °С с погрешностью до ±10 мВ. Провода изготавливаются по ГОСТ 5.1236-72. Проволока для проводов изготавливается по ГОСТ 1791-67
Копель	Копель по ГОСТ 492-2006	

2.3. Термопара железо-константан (ТЖК)

Основные свойства и области применения

Термопары данного типа широко используются в промышленности и научных исследованиях. Термопара железо-константан позволяет проводить измерения в восстановительных, окислительных, а также инертных средах и вакууме. Термопара ЖКн позволяет измерять как положительные температуры (до 1100 °С), так и отрицательные (до -203 °С). Следует отдельно заметить, что именно измерение положительных совместно с отрицательными температурами является рекомендуемым применением термопары данного типа. Использование данных термопар для измерения исключительно отрицательных температур не рекомендуется, так как существуют аналоги с лучшими характеристиками. При длительном применении максимальная рабочая температура составляет 750 °С, при кратковременном – 1100 °С.

Термопары данного типа имеют высокую чувствительность, которая составляет 50-65 мкВ/°С. Также стоит отметить их сравнительно низкую стоимость. К недостаткам термопар данного типа можно отнести высокую чувствительность к деформации термоэлектродов, а также низкую коррозионную стойкость железного термоэлектрода.

Материал термоэлектродов

В термопаре ЖКн положительный электрод выполнен из технически чистого железа (малоуглеродистой стали), отрицательный – из медно-никелевого сплава константан МНМц 40-1,5 (ГОСТ 492-2006). Стоит заметить, что специально для термометрии железную проволоку не изготавливают, используется проволока, предназначенная для других целей.

Рекомендуемая рабочая среда

Термопара железо-константан устойчиво работает в окислительной и восстановительной атмосферах. При температурах около 769 °С и 910 °С железо, из которого изготовлен положительный электрод термопары, претерпевает магнитное и $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращения, которые влияют на термоэлектрические свойства. В связи с вышесказанным термопара, находившаяся при температурах выше 760 °С даже в течение короткого временного интервала, не может использоваться для дальнейших точных измерений при температурах ниже 760 °С, так как ее показания могут не соответствовать градуировочной таблице.

Срок службы термопары зависит от поперечного сечения термоэлектродов. Диаметр электродов термопары следует выбирать прямопропор-

ционально измеряемой температуре. В некоторых источниках приводятся следующие рекомендации по выбору диаметра электродов термопар в чехлах для длительного измерения температуры: 760 °С – 3,2 мм; 590 °С – 1,6 мм; 480 °С – 0,8 мм; 370 °С – 0,3-0,5 мм.

При температурах больших 500 °С использование термопары ЖКн в атмосфере, содержащей серу, возможно только при наличии надежной газоплотной защиты.

2.4. Термопара вольфрам-рений (ТВР)

Основные свойства и области применения

Термопара вольфрам-рений является одной из лучших среди промышленных термопар для измерения температур выше 1800 °С. Термопара ВР используется для измерения температур до 3000 °С. Нижний предел измеряемых температур, как правило, ограничен 1300 °С. Рабочей атмосферой является аргон, азот, гелий, сухой водород или вакуум. Термо-ЭДС при 2500 °С составляет 34 мВ для термопар из сплавов ВР5/20 и ВАР5⁵/ВР20 и 22 мВ для термопар из сплава ВР10/20, чувствительность термопар – 7-10 и 4-7 мкВ/°С соответственно.

Термопары вольфрам-рений обладают хорошими механическими свойствами при высоких температурах, могут работать при воздействии больших знакопеременных нагрузках, а также при частых и резких теплосменах. Термопары данного типа неприхотливы при изготовлении и монтаже, так как сравнительно мало чувствительны к загрязнению.

Среди недостатков термопар ВР можно выделить плохую воспроизводимость⁶ термо-ЭДС; нестабильность термо-ЭДС в условиях облучения; значительное падение чувствительности при температурах выше 2400 °С.

5 ВАР5

сплав вольфрама с рением, содержащий 5% рения, кремнещелочную и алюминиевую присадки; остальное – вольфрам.

6 Воспроизводимость

характеристика результатов измерений, определяемая взаимной близостью результатов повторных измерений. В случае термопар необходимо, чтобы при проведении повторных измерений одной и той же температуры полученные значения термо-ЭДС были близки к первоначальному.

Стоит заметить, что термопара из сплавов ВАР5/ВР20 дает более точный результат при длительных измерениях, чем термопара из сплавов ВР5/20.

Градуировка термопар вольфрам-рений осуществляется по градуировочным таблицам в соответствии с [ГОСТ 3044-84](#). Проволока для термоэлектродов из сплавов ВР5, ВАР5 и ВР20 изготавливается по техническим условиям. Термоэлектродная проволока из сплава ВР10 серийно не производится.

Термопары ВР применяют в отраслях промышленности, связанных с высокими температурами. Например, вольфрам-рениевая термопара используется для измерения температуры при производстве тугоплавких металлов, твердых сплавов и керамики, при выплавке и разливе сталей и сплавов, для измерения температуры газовых потоков и низкотемпературной плазмы в газотурбинных двигателях, МГД-генераторах, а также в атомной энергетике.

Материал термоэлектродов

В вольфрам-рениевых термопарах материалами для электродов служат сплавы ВР5 – положительный термоэлектрод и ВР20 – отрицательный; ВАР5 – положительный термоэлектрод и ВР20 – отрицательный или ВР10 – положительный термоэлектрод и ВР20 – отрицательный.

Рекомендуемая рабочая среда

Термопары вольфрам-рений предназначены для длительного измерения температуры в чистых инертных средах, сухом водороде и вакууме. Даже небольшое количество кислорода существенно уменьшает срок службы термопары. В окислительных средах термопары данного типа могут быть использованы только для измерения температуры в быстротекущих процессах. При значениях температуры выше значений, при которых начинается катастрофическое окисление, срок службы термопары исчисляется минутами.

Использование термопар ВР не рекомендуется в атмосфере влажного водорода и углеродсодержащих восстановительных средах. Реакция вольфрам-рениевых сплавов с парами углеводородов начинается уже при 1000 °С. Взаимодействие с углеродом может привести к охрупчиванию термоэлектродов и существенному увеличению нестабильности термопары. Возникновение хрупкости наблюдается уже при 1700 °С. Контакт с углеродом понижает предельную измеряемую температуру до 2500 °С. Однако, существуют случаи использования термопары вольфрам-рений в высокотемпературных печах с графитовыми нагревателями. Общий вывод можно сформулировать следующим образом: срок службы термопары зависит в большой степени от характера атмосферы, материала изоляции и рабочей температуры.

Удлиняющие провода

Таблица 4. Удлиняющие провода к термопаре вольфрам-рений

Электрод термопары	Сплавы для удлиняющих проводов	Характеристика проводов
ВР5 (ВАР5)	Медь марки М1 (по ГОСТ 859-66)	Суммарная компенсация в диапазоне 0-100 °С с погрешностью ±0,03 мВ. Проволока для проводов изготавливается по техническим условиям
ВР20	Сплав марки МН 2,4 Cu + (2,2-2,6)% Ni	
ВР5 (ВАР5)	Сплав марки МН 12 Cu + (10-13)% Ni	Суммарная компенсация в диапазоне 0-500 °С с погрешностью ±0,06 мВ (до 200 °С); 0,09 (300 °С); 0,12 (400 °С) и 0,15 (500 °С) мВ
ВР20	Сплав марки МН 28 Cu + (24-28)% Ni	
ВР10	Медь марки М1 (по ГОСТ 859-66)	Суммарная компенсация в диапазоне 0-100 °С с погрешностью ±0,02 мВ. Проволока для проводов изготавливается по техническим условиям.
ВР20	Сплав марки МН 1,2 Cu + (1,0-1,5)% Ni	
ВР10	Сплав марки МН 14 Cu + (13-17)% Ni	Суммарная компенсация в диапазоне 0-500 °С с погрешностью ± 0,02; 0,04; 0,06; 0,08 и 0,10 мВ при температурах 100, 200, 300, 400 и 500 °С соответственно
ВР20	Сплав марки МН 26 Cu + (22-26)% Ni	

Изоляция и защита

Для изоляции термоэлектродов используют керамику из BeO, HfO₂, ThO₂, Y₂O₃. Окись бериллия может использоваться при температурах, не превышающих температуру плавления данного материала (~2570 °С). BeO является самым часто употребляемым изолятором для термопар ВР. Следует отметить, что необходимо использовать BeO чистотой не менее 99,9%.

Для измерения температур ниже 1600 °С электроды термопары изолируют окисью Al₂O₃ чистотой 99,5% или

MgO. При этом керамика должна быть прокалена для удаления органических и неорганических примесей.

При очень высоких температурах используют термопары с неизолированными термоэлектродными. В окислительных средах для защиты термопары используют главным образом металлические чехлы из Nb, Ta, Mo и сплавов Mo-Re, W-Re с покрытиями. Термопара с термоэлектродными, покрытыми иридием, может кратковременно эксплуатироваться на воздухе (30-40 часов при температуре 2000-2400 °С).

2.5. Термопара вольфрам-молибден (ВМ)

Основные свойства и области применения

Термопара предназначена для измерения высоких температур. Измерения с помощью термопары вольфрам-молибден (ВМ) могут проводиться в инертных средах, среде водорода или вакууме. Диапазон измеряемых температур составляет 1400-1800 °С, предельная рабочая температура ~2400 °С. Термопара ВМ имеет чувствительность 6,5 мкВ/°С в указанном диапазоне температур. Термоэлектроды имеют высокую механическую прочность. При изготовлении, монтаже и эксплуатации термопары не предъявляются жесткие требования к соблюдению химической чистоты. Термопара вольфрам-молибден является самой дешевой в изготовлении среди прочих термопар пригодных для измерения высоких температур.

Среди недостатков термопары ВМ можно выделить плохую воспроизводимость термо-ЭДС; небольшую величину термо-ЭДС и чувствительности; инверсию полярности; охрупчивание после нагрева при высоких температурах.

Основная область применения термопары ВМ – кратковременные измерения температуры жидких сталей, сплавов и шлаков в различного рода печах, конверторах и ковшах. Стоит заметить, что с появлением термопар вольфрам-рений (см. Глава 2.4) и платинородий-платинородий (см. Глава 2.7) термопара вольфрам-молибден

стала использоваться для измерения температур в процессах выплавки и разлива только неотчетственных сплавов.

Проволока для изготовления термоэлектродов из вольфрама и молибдена поставляется по техническим условиям.

Материал термоэлектродов

Для изготовления термоэлектродов термопар ВМ используются металлы технической чистоты. Металлы высокой чистоты, как правило, не применяются, так как значительно увеличивают стоимость термопары и предъявляют повышенные требования к отсутствию загрязнения.

Положительный электрод в термопаре вольфрам-молибден сделан из вольфрама, отрицательный – из молибдена (по причине инверсии полярности данное утверждение справедливо для температур выше 1400 °С). Для изготовления вольфрамовой проволоки используют штабики марки ВРН, для изготовления молибденовой проволоки – штабики марки МЧ.

Рекомендуемая рабочая среда

Термопара вольфрам-молибден служит для измерения температуры в среде водорода, инертных газов или вакууме. Вольфрам и молибден начинают окисляться на воздухе при температуре около 400 °С. С ростом температуры процесс окисления усиливается. Указанные металлы не вступают в ре-

акцию с водородом вплоть до температуры плавления и инертными газами. При этом ни водород, ни инертные газы не должны содержать окисляющих примесей. Обычный диапазон рабочих температур термопары ВМ в условиях промышленной эксплуатации составляет 1400-1800 °С. В специальных случаях данный диапазон может быть расширен до 2100 °С. При этом рекомендуется использовать термопа-

ру без изоляции, так как при температурах больше 2000 °С молибден и вольфрам начинают взаимодействовать со многими окислами, из которых обычно изготавливают изоляцию.

Если электроды защищены с помощью керамики и термопара имеет защитный колпачок, то с ее помощью можно проводить кратковременные измерения температуры в окислительных средах и расплавленных металлах.

Удлиняющие провода

Таблица 5. Удлиняющие провода к термопаре вольфрам-молибден

Электрод термопары	Сплавы для удлиняющих проводов	Характеристика проводов
Вольфрам	Сплав марки МН 0,3 Cu + (0,2-0,5)% Ni	Суммарная компенсация в диапазоне 0-100 °С с погрешностью ±0,03 мВ. Проволока изготавливается по техническим условиям
Молибден	Медь марки М1 (по ГОСТ 859-66)	

Изоляция и защита

Термоэлектроды термопар вольфрам-молибден для разовых измерений температуры жидкой стали изолируют глиноземистой керамикой (Al₂O₃) и защищают кварцевыми наконечниками.

2.6. Термопары платинородий-платина (ТПП)

Основные свойства и области применения

Термопары платинородий-платина являются одними из самых распространенных для измерения температур до 1600 °С. К данному типу относятся термопары, изготовленные из платины и сплава платины с родием (10% Rh), и из платины и сплава платины с родием (13% Rh). Термопары ПП предназначены для выполнения измерений температуры в окислительных и инертных средах. Предельная рабочая температура при длительных измерениях составляет 1400 °С, при кратковременных – 1600 °С. Термопары платинородий-платина имеют практически линейную термоэлектрическую характеристику в области температур 600-1600 °С, чувствительность 10-12 мкВ/°С (10% Rh) и 11-14 мкВ/°С (13% Rh). Другими достоинствами данных термопар являются высокая точность измерений, хорошая воспроизводимость и стабильность термо-ЭДС. Стоит заметить, что термопары данного типа выступают в качестве эталонных приборов для воспроизведения Международной практической температурной шкалы (МПТШ) в области температур от 630,74 до 1064,43 °С.

К недостаткам термопар ПП можно отнести высокую стоимость, нестабильность работы в условиях облучения, высокую чувствительность к загрязнениям металлическими и неметаллическими примесями при изготовлении, монтаже и эксплуатации.

Термопары платинородий-платина используются в различных отраслях промышленности и науки, где требуется высокая точность и надежность измерений.

Градуировка термопары ПП (10% Rh) осуществляется по [ГОСТ 3044-84](#), термоэлектродная проволока изготавливается по ГОСТ 10821-75. Термоэлектродная проволока для термопар ПП (13% Rh) изготавливается по техническим условиям.

Для изготовления термопары ПП используются сплавы платины с родием ПР10 или ПР13, содержащие 10% и 13% родия (Rh) соответственно и чистая платина.

Материал термоэлектродов

Положительным является термоэлектрод, изготовленный из платинородия, отрицательным – из платины.

Рекомендуемая рабочая среда

Рекомендуемая рабочая среда

Термопара платинородий-платина предназначена для измерения температуры в окислительных и инертных средах. При наличии защиты термопары данного типа могут быть использованы для измерений в восстановительных средах и средах, содержащих пары мышьяка, серы, свинца, цинка, фосфора.

На практике термопары ПП редко применяются для измерения температур ниже 0 °С. Дело в том, что чувстви-

тельность термопары данного типа падает при понижении температуры и становится равной нулю при -138 °С. Тем не менее, в некоторых стандартах термо-ЭДС термопар нормируется при температурах до -50 °С. Термопары платинородий-платина не используются для измерения температур в диапазоне 0-300 °С, а для температур 300-600 °С применяются только для получения сравнительных данных.

Верхний температурный предел кратковременного применения термопары ПП ограничивается 1600 °С, долговременного применения – 1400 °С. При температурах больших 1400 °С происходит стремительный рост зерен платинового термоэлектрода. При наличии хорошей защиты термопару можно использовать для длительных измерений при температурах до 1500 °С.

Удлиняющие провода

Таблица 6. Удлиняющие провода к термопаре вольфрам-рений

Электрод термопары	Сплавы для удлиняющих проводов	Характеристика проводов
ПР10 и ПР13	Медь ММ по ГОСТ 2112-71	Суммарная компенсация до 100 °С с погрешностью ±0,03 мВ.
Платина	Сплав ТП (МН 0,6) по ГОСТ 492-2006	Проволока из меди изготавливается по ГОСТ 2112-71, из сплава ТП – по ГОСТ 1791-67 ; удлиняющие провода по ГОСТ 5.1236-72
ПР10	Сплав КПП Cu + 3,2% Si	Поэлектродная компенсация в интервале 0-80 °С.
Платина	Сплав КП Cu + 5% Ni + 3,7% Mn	Проволока для удлиняющих проводов изготавливается по техническим условиям
ПР10	Сплав Cu + 8% Mn	Суммарная компенсация в интервале 0-200 °С
Платина	Сплав Cu + 0,6% Ni	
ПР10	Сплав Cu + 0,1% Ni	Суммарная компенсация в интервале 0-200 °С
Платина	Сплав Cu + 1% Ni	

Изоляция и защита

Изоляцией для термоэлектродов рабочих термопар вплоть до температуры 1200 °С могут служить кварц, фарфор, муллит, силлиманит, огнеупорный фарфор. Термоэлектроды образцовых термопар изолируют плавленным кварцем. Если термопара используется для измерения температур до 1400 °С, то в качестве изоляции применяется керамика с повышенным содержанием Al_2O_3 . В слабоокислительной и восстановительной атмосфере при температурах больше 1200 °С, а также во всех случаях применения термопар при температурах больше 1400 °С следует использовать керамику из высокочистой окиси алюминия. При работе в восстановительной атмосфере иногда в качестве изоляции применяют окись магния.

Внутренние чехлы для термопар, как правило, изготавливают из тех же материалов, из которых сделана изоляционная керамика. Обязательным условием является газоплотность⁷ таких материалов.

Для защиты рабочих спаев термопар, предназначенных для разовых измерений температуры жидких сталей и сплавов, применяются кварцевые наконечники.

Рекомендации по эксплуатации

Термопары ПП очень чувствительны к различного рода химическим загрязнениям, которые могут быть причиной охрупчивания и снижения прочности, а также возникновения сильного дрейфа показаний термопары. Особенно чувствителен к загрязнениям платиновый электрод. Источниками загрязнения могут стать материалы, из которых изготовлена изоляция и защитный чехол, нагревательное устройство и его атмосфера, предметы, находящиеся в непосредственной близости от термопары.

Рекомендации для предотвращения загрязнения термоэлектродов.

Термоэлектроды должны быть изолированы одной двухканальной керамической трубкой по всей рабочей длине. Между изолирующей трубкой и керамическим защитным чехлом, так же как между термоэлектродами и трубкой, должны быть достаточные, хорошо вентилируемые зазоры.

⁷ Газоплотность

способность материала сопротивляться проникновению сквозь него газов под давлением.

2.7. Термопары платинородий-платинородий (ТПР)

Основные свойства и области применения

Термопара ПР предназначена для измерения температуры в окислительных и нейтральных средах. Также возможно ее использование в вакууме. Максимальная рабочая температура при длительных измерениях составляет 1600 °С, при кратковременных – 1800 °С. При температурах выше 1200 °С термопара платинородий-платинородий имеет линейную термоэлектрическую характеристику, чувствительность 10,5-11,5 мкВ/°С и хорошую стабильность термо-ЭДС. Термопара ПР может применяться без удлиняющих проводов благодаря низкой чувствительности в области температур 0-100 °С.

В сравнении с термопарами платинородий-платина термопара платинородий-платинородий имеет немного меньшую термо-ЭДС, при этом с ее помощью можно измерять более высокие температуры. Термопара ПР имеет большую механическую прочность, большую стабильность при высоких температурах, меньшую склонность к росту зерна и охрупчиванию, а также меньшую чувствительность к загрязнению.

Следует тщательно очистить термоэлектроды от следов смазки и жира перед их помещением в изолирующую и защитную керамику. Металлические чехлы должны быть также очищены от грязи, остатков смазки, стружки и др. Перед монтажом все компоненты термопары – электроды, изолирующую и защитную керамику и чехлы – необходимо отжечь при высокой температуре. Конструкция термопары должна быть такой, чтобы термоэлектроды не служили опорой для изолирующей керамики. Данная рекомендация особенно важна для термопар, устанавливаемых вертикально.

Термопара ПР активно используется в областях, где необходимо длительное измерение температуры выше 1400 °С. К таким областям относятся металлургия, стеклоплавильная, цементная промышленность, производство огнеупоров. Также термопары данного типа применяются в образцовых термометрах.

Градуировка термопары платинородий-платинородий осуществляется по [ГОСТ 3044-84](#), термоэлектродная проволока изготавливается по ГОСТ 10821-75.

Материал термоэлектродов

Для изготовления термопары ПР используются сплавы платины с родием ПР30 и ПР6, содержащие 30% и 6% родия (Rh) соответственно. Чистота платины и родия, которые используются в производстве сплавов, должна быть больше или равна 99,95%.

Положительным является термоэлектрод, изготовленный из платинородия ПР30, отрицательным – из платинородия ПР6.

Рекомендуемая рабочая среда

Термопары платинородий-платинородий используются в окислительных и нейтральных средах, а также в вакууме. Максимальная рабочая температура термопары ПР определяется температурой плавления отрицательного термоэлектрода, изготовленного из сплава ПР6 (1820 °С) и составляет 1800 °С (по [ГОСТ 3044-84](#) и [ГОСТ 6616-94](#) при кратковременных измерениях). При длительных измерениях рабочая температура ограничивается значением 1600 °С.

Без надежной защиты нельзя использовать термопары данного типа в восстановительных атмосферах и атмосферах, содержащих пары металлов и неметаллов.

Удлиняющие провода

Таблица 7. Удлиняющие провода к термопаре платинородий-платинородий

Электрод термопары	Сплавы для удлиняющих проводов	Характеристика проводов
ПР30	Нионик 30	Поэлектродная компенсация до 400 °С
ПР6	Нионик 6	
ПР30	ВРХ	Суммарная компенсация до 200 °С
ПР6	ВНХ	

Изоляция и защита

Для изоляции и защиты термопар ПР применяют керамику из Al_2O_3 высокой чистоты.

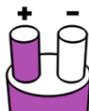
Рекомендации по эксплуатации

Причины выхода термопар платинородий-платинородий из строя вследствие охрупчивания, снижения механической прочности или исключительно большого дрейфа термо-ЭДС, как правило, совпадают с причинами аналогичных проблем, возникающих у термопар платинородий-платина. Но выход из строя термопар ПР происходит значительно реже по сравнению с термопарами ПП, так как сплавы платины с родием менее подвержены химическим загрязнениям и росту зерна, чем чистая платина, из которой изготавливают отрицательный электрод термопары ПП.

2.8. Сводная таблица типов термопар

Сводная таблица содержит основные параметры термопар, имеющих стандартные градуировки. В данную таблицу не включены термопары с индивидуальными градуировками, например, термопара вольфрам-молибден (см. Глава 4.3).

Таблица 8. Сводная таблица типов термопар

Тип термопары	Материалы термоэлектродов		Диапазон рабочих температур, °C	Цветовая кодировка
	положительного	отрицательного		
ТПП (S) Глава 2.6	Платинородий (10% Rh)	Платина	0 - 1300 (1600)	
ТПП (R) Глава 2.6	Платинородий (13% Rh)	Платина	0 - 1300 (1600)	
ТПР (B) Глава 2.7	Платинородий (30% Rh)	Платинородий (6% Rh)	600 – 1700	-
ТХК (L) Глава 2.2	Хромель	Копель	-200 – 700 (900)	
ТХА (K) Глава 2.1	Хромель	Алюмель	-200 – 1200 (1300)	
ТЖК (J) Глава 2.3	Железо	Константан	-200 – 750 (900)	
ТВР (A) Глава 2.4	Вольфрам-рений (5% Re)	Вольфрам-рений (20% Re)	0 – 2200 (2500)	-

Примечания:

- в столбце «Диапазон рабочих температур» в скобках указана предельная рабочая температура при кратковременном применении;
- в столбце «Цветовая кодировка» описана цветовая кодировка, принятая Международной электротехнической комиссией (МЭК).

3.1. Требования, предъявляемые к термоэлектродным сплавам

Термопары применяются для измерения широкого диапазона температур в различных средах. При этом измерительные приборы должны обеспечивать надлежащую точность и иметь приемлемые сроки службы. В связи с перечисленными выше особенностями к материалам, применяемым для производства термопар, предъявляются специальные требования.

1. Термо-ЭДС термоэлектродных сплавов, образующих термопару, должна быть достаточно большой для того, чтобы ее можно было измерить с необходимой точностью. Желательно, чтобы величина термо-ЭДС линейно зависела от величины температуры.

2. Температура плавления термоэлектродных сплавов должна быть выше максимальной рабочей температуры термопары. Разница между указанными температурами должна составлять не менее 50 °C.

3. Термоэлектродные сплавы должны обладать коррозионной стойкостью в рабочей среде термопары. Данное требование не всегда может быть выполнено, поэтому в таких случаях термоэлектроды защищают от воздействия среды с помощью защитного чехла.

4. Термоэлектродные сплавы должны отличаться воспроизводимыми и однородными свойствами при производстве их в промышленных масштабах.

5. Сплавы для термопар должны сохранять свою термоэлектрическую характеристику неизменной в процессе градуировки и эксплуатации.

6. Сплавы для термопар должны обладать хорошей пластичностью и прочностью.

3.2. Никелевые и медно-никелевые сплавы

Никелевые и медно-никелевые сплавы нашли широкое применение в изготовлении термоэлектродов термопар и компенсационных проводов. Наиболее востребованными при производстве термопар являются никелевые сплавы алюмель и хромель, медно-никелевые – копель и константан.

[Алюмель]

Никелевый сплав, предназначенный для производства термоэлектродов термопар и компенсационных проводов. Используется в термопарах ХА (хромель-алюмель) в качестве отрицательного электрода (см. Глава 2.1). Марка данного сплава имеет следующее обозначение: НМцАК 2-2-1.

Химический состав

Основным химическим элементом, входящим в состав сплава алюмель, является никель (Ni). Помимо никеля сплав НМцАК 2-2-1 содержит 0,6-1,2% кобальта (Co); 1,6-2,4% алюминия (Al); 1,8-2,7% марганца (Mn); 0,85-1,50% кремния (Si). Сумма примесей, в состав которых входят мышьяк (As), углерод

8 Температурный коэффициент электрического сопротивления

величина, равная отношению электрического сопротивления участка электрической цепи или удельного сопротивления вещества при изменении температуры на единицу; характеризует зависи-

мость электрического сопротивления от температуры

(C), железо (Fe), фосфор (P), свинец (Pb), сера (S) и некоторые другие вещества, составляет 0,7%.

Физические свойства

Таблица 9. Физические свойства сплава алюмель

Свойство	Значение
Температура плавления, °C	1400
Плотность, кг/м ³	8670
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	33±5
Средний температурный коэффициент электросопротивления ⁸ (20-100 °C), °C ⁻¹ ·10 ⁻⁴	23,9
Средний температурный коэффициент термического расширения ⁹ (20-100 °C), °C ⁻¹ ·10 ⁻⁶	12,0
Магнитные свойства	Слабо ферромагнитен ¹⁰
Температура Кюри, °C	170

9 Температурный коэффициент термического расширения (коэффициент теплового расширения)

величина, характеризующая относительное изменение объема или линейных размеров тела с увеличением температуры на один градус при постоянном давлении.

Значения некоторых физических свойств изменяются в зависимости от температуры сплава.

Таблица 10. Физические свойства сплава алюмель в зависимости от температуры

Свойство	Температура, °C						
	20	200	400	600	800	1000	1200
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	33	47	54	60	65	71	77
Отношение электросопротивления при температуре <i>t</i> к электросопротивлению при температуре 20 °C	1,00	1,43	1,64	1,82	1,98	2,15	2,32
Средний температурный коэффициент термического расширения (20- <i>t</i> °C), °C ⁻¹ ·10 ⁻⁶	-	12,2	12,6	13,6	14,7	15,8	16,9
Удельная теплоемкость, кДж/кг·K	0,475	0,489	0,503	0,518	0,533	0,548	0,564
Теплопроводность, Вт/м·K	26,8	29,3	35,2	40,2	44,4	47,7	-

Механические свойства

Таблица 11. Механические свойства сплава алюмель

Свойство	Значение
Предел прочности, МПа	550-660
Предел текучести, МПа	190-230
Относительное удлинение, %	28-38
Поперечное сужение, %	68-78
Твердость по Бринеллю	120-130

10 Ферромагнетизм

появление спонтанной намагниченности при температуре ниже температуры Кюри вследствие упорядочения магнитных моментов, при котором большая их часть параллельна друг другу. Вещества, в которых возникает ферромагнитное

упорядочение магнитных моментов, называются ферромагнетиками.

[Хромель]

Никелевый сплав, предназначенный для производства термоэлектродов термопар и компенсационных проводов. Используется в термопарах ХА (хромель-алюмель), ХК (хромель-копель) в качестве материала положительного электрода (см. Глава 2.2). Марка данного сплава имеет следующее обозначение: НХ 9,5.

Химический состав

Основным химическим элементом, входящим в состав сплава хромель, является никель (Ni). Помимо никеля сплав НХ 9,5 содержит 0,6-1,2% кобальта (Co) и 9,0-10,0% хрома (Cr). Сумма примесей, в состав которых входят мышьяк (As), углерод (C), железо (Fe), фосфор (P), свинец (Pb), сера (S) и некоторые другие вещества, составляет 1,4%.

11 Парамагнетики

вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении внешнего магнитного поля и имеют положительную магнитную восприимчивость. Парамагнетики относятся к слабомагнитным веществам.

Физические свойства

Таблица 12. Физические свойства сплава хромель

Свойство	Значение
Температура плавления, °C	1430
Плотность, кг/м ³	8730
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	68±5
Средний температурный коэффициент электросопротивления (20-100 °C), °C ⁻¹ ·10 ⁻⁴	4,1
Средний температурный коэффициент термического расширения (20-100 °C), °C ⁻¹ ·10 ⁻⁶	13,1
Магнитные свойства	Парамагнитен ¹¹
Температура Кюри, °C	-120

Значения некоторых физических свойств изменяются в зависимости от температуры сплава.

Таблица 13. Физические свойства сплава хромель в зависимости от температуры

Свойство	Температура, °C						
	20	200	400	600	800	1000	1200
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	68	74	81	85	88	93	97
Отношение электросопротивления при температуре <i>t</i> к электросопротивлению при температуре 20 °C	1,00	1,09	1,19	1,25	1,30	1,37	1,43
Средний температурный коэффициент термического расширения (20- <i>t</i> °C), °C ⁻¹ ·10 ⁻⁶	-	13,3	13,7	14,7	15,7	16,7	17,7
Удельная теплоемкость, кДж/кг·K	0,428	0,460	0,495	0,531	0,567	0,602	0,638
Теплопроводность, Вт/м·K	17,6	21,8	26,4	30,6	34,3	37,7	-

Механические свойства

Таблица 14. Механические свойства сплава хромель

Свойство	Значение
Предел прочности, МПа	620-720
Предел текучести, МПа	210-240
Относительное удлинение, %	24-34
Поперечное сужение, %	67-77
Твердость по Бринеллю	140-150



[Копель]

Медно-никелевый сплав, предназначенный для производства термоэлектродов термопар и компенсационных проводов. Используется в термопарах ХК (хромель-копель) в качестве материала отрицательного электрода (см. Глава 2.2). Марка данного сплава имеет следующее обозначение: МНМц 43-0,5.

Химический состав

Основными химическими элементами, входящими в состав сплава копель, являются никель (Ni), кобальт (Co) и медь (Cu). Содержание никель + кобальт (Ni + Co) составляет 42,5-44,0%, остальное – медь (Cu). Помимо никеля сплав МНМц 43-0,5 содержит 0,1-1,0% марганца (Mn). Сумма примесей, в состав которых входят мышьяк (As), углерод (C), железо (Fe), фосфор (P), свинец (Pb), сера (S) и некоторые другие вещества, составляет 0,6%.

Физические свойства

Таблица 15. Физические свойства сплава копель

Свойство	Значение
Температура плавления, °С	1220
Плотность, кг/м ³	8920
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	48
Средний температурный коэффициент электросопротивления (20-100 °С), °С ⁻¹ ·10 ⁻⁴	-0,1
Средний температурный коэффициент термического расширения (20-100 °С), °С ⁻¹ ·10 ⁻⁶	14,9
Теплопроводность при 100 °С, Вт/м·К	21
Удельная теплоемкость при 20 °С, кДж/кг·К	0,40

Значения некоторых физических свойств изменяются в зависимости от температуры сплава.

Таблица 16. Физические свойства сплава копель в зависимости от температуры

Свойство	Температура, °С					
	20	200	400	600	800	1000
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	48,0	47,8	47,7	49,2	50,8	52,5
Отношение электросопротивления при температуре <i>t</i> к электросопротивлению при температуре 20 °С	1,00	0,997	0,995	1,03	1,06	1,09
Средний температурный коэффициент термического расширения (20- <i>t</i> °С), °С ⁻¹ ·10 ⁻⁶	-	15,3	15,8	16,8	17,8	18,8
Теплопроводность, Вт/м·К	-	25	33	40	49	58

Механические свойства

Таблица 17. Механические свойства сплава копель

Свойство	Значение
Предел прочности, МПа	450
Относительное удлинение, %	40
Поперечное сужение, %	75
Твердость по Бринеллю	90

[Константан]

Медно-никелевый сплав, предназначенный для производства термоэлектродов термопар и компенсационных проводов. Используется в термопарах ЖКн (железо-константан) в качестве материала отрицательного термоэлектрода (см. Глава 2.3). Марка данного сплава имеет следующее обозначение: МНМц 40-1,5.

Химический состав

Основными химическими элементами, входящими в состав сплава константан, являются никель (Ni), кобальт (Co) и медь (Cu). Содержание никель + кобальт (Ni + Co) составляет 39,0-41,0%, остальное – медь (Cu). Помимо никеля сплав МНМц 40-1,5 содержит 1,0-2,0% марганца (Mn). Сумма примесей, в состав которых входят мышьяк (As), углерод (C), железо (Fe), фосфор (P), свинец (Pb), сера (S) и некоторые другие вещества, составляет 0,9%.

Физические свойства

Таблица 18. Физические свойства сплава хромель

Свойство	Значение
Температура плавления, °C	1220
Плотность, кг/м ³	8920
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	48
Средний температурный коэффициент электросопротивления (20-100 °C), °C ⁻¹ ·10 ⁻⁴	-0,1
Средний температурный коэффициент термического расширения (20-100 °C), °C ⁻¹ ·10 ⁻⁶	14,9
Теплопроводность при 100 °C, Вт/м·K	21
Удельная теплоемкость при 20 °C, кДж/кг·K	0,40

Значения некоторых физических свойств изменяются в зависимости от температуры сплава.

Таблица 19. Физические свойства сплава константан в зависимости от температуры

Свойство	Температура, °C					
	20	200	400	600	800	1000
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	48,0	47,8	47,7	49,2	50,8	52,5
Отношение электросопротивления при температуре <i>t</i> к электросопротивлению при температуре 20 °C	1,00	0,997	0,995	1,03	1,06	1,09
Средний температурный коэффициент термического расширения (20- <i>t</i> °C), °C ⁻¹ ·10 ⁻⁶	-	15,3	15,8	16,8	17,8	18,8
Теплопроводность, Вт/м·K	-	25	33	40	49	58

Механические свойства

Таблица 20. Механические свойства сплава константан

Свойство	Значение
Предел прочности, МПа	450
Относительное удлинение, %	40
Поперечное сужение, %	75
Твердость по Бринеллю	90

3.3. Тугоплавкие металлы и сплавы

Тугоплавкие металлы и сплавы нашли широкое применение в изготовлении термоэлектродов термопар для измерения высоких температур. Наиболее востребованными при производстве термопар являются вольфрам-рениевые сплавы ВР, тугоплавкие металлы вольфрам и молибден.

[Сплавы вольфрам-рений]

Наиболее распространенными вольфрам-рениевыми сплавами для производства термопар являются сплавы ВР5 и ВР20. Данные сплавы служат для изготовления термоэлектродов для термопар ВР (вольфрам-рений – вольфрам-рений) (см. Глава 2.4).

Химический состав

Основным компонентом, входящим в состав сплавов ВР является вольфрам (W). В зависимости от марки каждый сплав содержит разное количество рения (Re). Так сплав ВР5 содержит $5 \pm 0,5\%$ рения (Re), ВР20 – $20 \pm 0,5\%$ рения (Re). Содержание примесей и присадок в данных сплавах не должно превышать 0,1%.

Физические свойства

Таблица 21. Физические свойства сплава вольфрама с рением в зависимости от температуры

Свойство	Сплав	Температура, °С									
		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	ВР5	40	46	52	58	64	71	77	84	91	98
	ВР20	54	60	66	73	79	85	91	97	103	109
Отношение электросопротивления при температуре t к электросопротивлению при температуре 20 °С	ВР5	3,3	3,8	4,3	4,8	5,3	5,9	6,4	7,0	7,6	8,2
	ВР20	2,2	2,4	2,6	2,9	3,2	3,4	3,6	3,9	4,1	4,4
Средний температурный коэффициент термического расширения (20-t °С), °С ⁻¹ ·10 ⁻⁶	ВР5	4,8	4,9	-	4,9	-	5,0	-	-	-	-
	ВР20	5,0	5,1	-	5,2	-	5,3	-	-	-	-
Теплопроводность, Вт/м·К	ВР5	100	105	105	105	105	104	103	103	102	100
	ВР20	68	74	76	79	80	80	80	80	80	80
Полусферическая интегральная излучательная способность	ВР5	0,15	0,19	0,22	0,25	0,27	0,29	0,32	0,33	0,35	-
	ВР20	0,15	0,19	0,22	0,25	0,27	0,29	0,32	0,33	0,35	-

[Вольфрам]

Тугоплавкий металл вольфрам нашел применение при производстве высоко-температурных термопар. Для указанных целей используют вольфрам технической чистоты марки ВРН. Данный тугоплавкий металл применяется для изготовления положительных электродов термопары ВМ (вольфрам-молибден) (см. Глава 2.5).

Химический состав

Вольфрам марки ВРН содержит не менее 99,85% вольфрама (W) и не более 0,040% молибдена (Mo), 0,005% кремния (Si), 0,011% кальция (Ca), 0,005% никеля (Ni), 0,013% железа + алюминия (Fe + Al).

Физические свойства

Таблица 22. Физические свойства металла вольфрам в зависимости от температуры

Свойство	Температура, °C									
	20	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	5,5	33	39	46	52	59	66	72	79	86
Отношение электро-сопротивления при температуре <i>t</i> к электросопротивлению при температуре 20 °C	-	6,0	7,1	8,4	9,4	10,7	12,0	13,1	14,4	15,6
Термическое расширение $(l_t - l_{20})/l_{20}$, %	-	0,44	0,55	0,66	0,78	0,92	1,06	1,21	1,38	1,55
Теплопроводность, Вт/м·К	163	113	109	105	103	97	96	94	93	92
Удельная теплоемкость кДж/(кг·К)	0,132	0,151	0,153	0,157	0,159	0,163	0,167	0,170	0,172	0,174
Температуропроводность, м ² /с·10 ⁻⁶	-	37,0	35,0	33,5	32,5	31,5	30,5	29,5	28,5	27,5
Нормальная интегральная излучательная способность	-	0,130	0,155	0,185	0,210	0,235	0,255	0,270	0,285	0,300

Физические свойства

Таблица 23. Механические свойства металла вольфрам в зависимости от температуры

Свойство	Температура, °C									
	20	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
Модуль растяжения, ГПа	395	360	350	340	330	310	275	250	225	-
Предел прочности, МПа	2100	700	500	-	-	250	100	-	50	20

[Молибден]

Тугоплавкий металл молибден нашел применение при производстве высоко-температурных термопар. Для указанных целей используют молибден технической чистоты марки МЧ. Данный тугоплавкий металл применяется для изготовления отрицательных электродов термопары ВМ (вольфрам-молибден) (см. Глава 2.5).

Химический состав

Молибден марки МЧ содержит не менее 99,85% вольфрама (W) и не более 0,040% молибдена (Mo), 0,005% кремния (Si), 0,011% кальция (Ca), 0,005% никеля (Ni), 0,013% железа + алюминия (Fe + Al).

Физические свойства

Таблица 24. Физические свойства металла молибден в зависимости от температуры

Свойство	Температура, °C									
	20	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	5	27	34	40	46	54	60	66	72	-
Отношение электро-сопротивления при температуре <i>t</i> к электро-сопротивлению при температуре 20 °C	-	5,4	6,8	8,0	9,2	10,8	12,0	13,2	14,4	15,6
Термическое расширение (I _t - I ₂₀)/I ₂₀ , %	-	0,56	0,71	0,86	1,05	1,22	1,42	1,64	1,87	2,14
Теплопроводность, Вт/м·К	135	103	97	94	90	88	87	86	85	84
Удельная теплоемкость кДж/(кг·К)	0,247	0,314	0,327	0,343	0,360	0,377	0,394	0,410	0,431	0,452
Температуропроводность, м ² /с·10 ⁻⁶	55,0	28,5	28,5	24,5	22,5	21,5	20,5	19,5	18,5	-
Нормальная интегральная излучательная способность	-	0,115	0,135	0,155	0,180	0,200	0,220	0,240	0,260	0,280

Физические свойства

Таблица 25. Механические свойства металла молибден в зависимости от температуры

Свойство	Температура, °C									
	20	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
Модуль растяжения, ГПа	325	270	260	245	220	185	175	150	-	-
Предел прочности, МПа	1600	350	250	-	130	-	-	-	-	-

3.4. Благородные металлы и сплавы

[Платина]

Благородный металл платина используется для производства термопар, обладающих высокой точностью измерений. Для данных целей применяется чистая платина марки Плт. Из платины изготавливают отрицательные термоэлектроды в термопарах ПП (платино-родий-платина).

Химический состав

Для изготовления термоэлектродов термопар применяется чистая платина (100% Pt), у которой величина R_{100}/R_0^{12} должна быть не менее 1,3910.

12

Отношение значений электросопротивления при 100 и 0 °С принято использовать в качестве критерия чистоты платины.

Физические свойства

Таблица 26. Физические свойства металла платина

Свойство	Значение
Температура плавления, °С	1772
Плотность, кг/м ³	21450
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	10,4
Средний температурный коэффициент электросопротивления (20-100 °С), °С ⁻¹ ·10 ⁻⁴	39,2
Линейный коэффициент теплового расширения (20-100 °С), °С ⁻¹ ·10 ⁻⁶	9
Удельная теплоемкость при 20 °С, кДж/кг·К	0,132
Коэффициент теплопроводности при 20 °С, Вт/(м·К)	69,8

Значения некоторых физических свойств изменяются в зависимости от температуры сплава.

Таблица 27. Физические свойства металла платина в зависимости от температуры

Свойство	Температура, °С									
	20	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	10,40	17,46	24,61	31,29	37,51	43,28	48,58	53,40	57,1	
Отношение электросопротивления при температуре t к электросопротивлению при температуре 20 °С	1,00	1,68	2,37	3,01	3,61	4,16	4,67	5,14	5,49	
Средний температурный коэффициент термического расширения (20-t °С), °С ⁻¹ ·10 ⁻⁶	-	9,2	9,4	9,7	9,9	10,2	10,5	10,7	11,0	
Удельная теплоемкость кДж/(кг·К)	0,132	0,138	0,143	0,148	0,154	0,159	0,164	0,170	0,175	
Теплопроводность, Вт/м·К	69,8	70,1	72,1	74,9	78,7	82,1	86	91	92	
Температуропроводность, м ² /с·10 ⁻⁶	24,3	24,5	23,8	23,5	23,8	24,8	25,9	25,0	-	
Нормальная интегральная излучательная способность	-	0,036	0,062	0,090	0,115	0,135	0,152	0,166	0,179	

Механические свойства

Таблица 28. Механические свойства металла платина

Свойство	Значение
Модуль растяжения, ГПа	152
Модуль сдвига, ГПа	90
Предел прочности, МПа	140
Предел текучести (0,2%), МПа	80
Относительное удлинение, %	40
Твердость по Бринеллю	40

[Платинородий]

Сплав платины и родия, используемый для производства электродов термопар. Наиболее широкое распространение в данной области получили сплавы платины с родием марок ПР10, ПР13, ПР6, ПР30. Сплавы ПР10, ПР13 используются в термопарах ПП (платинородий-платина). Из данных сплавов изготавливают положительные термоэлектроды. Сплавы ПР30 и ПР6 используются в термопарах ПР (платинородий-платинородий). Из данных сплавов изготавливают положительные и отрицательные термоэлектроды соответственно.

Физические свойства

Таблица 29. Физические свойства сплава платинородий

Свойство	ПР6	ПР10	ПР13	ПР30
Температура плавления, °С	1820	1850	1860	1910
Плотность, кг/м ³	20600	19970	19610	17600
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 ⁻⁸	17,5	18,9	19,6	19,4
Средний температурный коэффициент линейного расширения, °С ⁻¹ ·10 ⁻⁶	10,4	10	10,1	10,3

Химический состав

Основным химическим элементом в сплавах платины с родием является платина. Процентное соотношение платины и родия меняется в зависимости от марки сплава. Содержание примесей не нормируется, но ограничивается использованием для изготовления сплавов платины и родия чистой большей или равной 99,95%. Сплав ПР6 – 94% платина (Pt), 6% родий (Rh); ПР10 – 90% платина (Pt), 10% родий (Rh); ПР13 – 87% платина (Pt), 13% родий (Rh); ПР30 – 70% платина (Pt), 30% родий (Rh).

Механические свойства

Таблица 30. Механические свойства сплава платинородий

Свойство	ПР6	ПР10	ПР13	ПР30
Предел прочности, МПа	250	320	360	550
Относительное удлинение, %	35	35	35	30
Твердость по Бринеллю	75	90	100	130

4.1. Производство термоэлектродной проволоки

Термоэлектродная проволока служит для изготовления электродов термопар. Данная проволока изготавливается в соответствии с требованиями государственных стандартов или технических условий в зависимости от типа термопары. Стандарты и технические условия регламентируют химический состав, физические свойства сплавов, из которых изготавливается проволока, а также ее механические свойства, размеры и предельные отклонения по ним.

Например, проволока для термопар хромель-алюмель должна соответствовать требованиям [ГОСТ 1790-77](#). В соответствии с указанным стандартом для изготовления термоэлектродов используется проволока следующих диаметров 0,2; 0,3; 0,5; 0,7; 1,2; 1,5; 3,2; 5 мм. Также данный стандарт регламентирует диаметры проволоки для термоэлектродов термопар хромель-копель, хромель-константан. [ГОСТ 1791-67](#) определяет диаметры проволоки, из которой изготавливаются удлиняющие провода к термопарам хромель-копель, хромель-алюмель и платиновых-родий-платина. Согласно указанному стандарту проволока может иметь диаметр 0,20; 0,30; 0,40; ... 1,00; ... 2,50 мм. ТУ 11-75 регламентирует размеры проволоки для изготовления электродов

термопар вольфрам-рений. Выпускается проволока диаметром 0,10; 0,20; 0,35 и 0,50 мм.

Термоэлектродную проволоку заданного диаметра получают при выполнении технологической операции протяжки. В зависимости от требуемого диаметра проволоки в качестве заготовки используется либо прутки, либо проволока большего диаметра, чем тот, который требуется изготовить. Протяжка может осуществляться в несколько этапов. В зависимости от материала, из которого изготовлена проволока, процесс протяжки может осуществляться совместно с подогревом, а также при наличии смазки. После протяжки проволока может подвергаться дополнительной термической или химической обработке для удаления смазки и улучшения свойств. Например, термопарную проволоку для электродов и удлиняющих проводов термопар ХА, ХК отжигают. Более подробно ознакомиться с процессом изготовления термопарной проволоки из вольфрама и молибдена можно в статьях [\[4\]](#) и [\[5\]](#).

4.2. Подбор пары

В процессе изготовления термопары возникает необходимость подбирать пару термоэлектродов, изготовленных из разных сплавов, таким образом, чтобы минимизировать отклонения реальной термо-ЭДС, развиваемой термопарой при заданных температурах, от стандартных значений. В настоящее время существует ряд методик, позволяющих выполнять такой подбор.

Для обеспечения подбора электродов, образующих пару, необходимо знать их термоэлектрические свойства при работе с одним и тем же эталонным термоэлектродом. В качестве эталонного термоэлектрода используется электрод, изготовленный из чистой платины.

Выбор платины в качестве материала эталонного термоэлектрода обусловлен следующими причинами:

- I. данный металл обладает высокой химической инертностью;
- II. данный металл имеет хорошо изученные физические свойства;
- III. данный металл имеет достаточно высокую температуру плавления.

Ниже приводится описание метода подбора термоэлектродов на примере термопары хромель-алюмель. Осуществляется заготовка термоэлектродов из сплава хромель необходимой длины. Каждый термоэлектрод соединяется в пару с платиновым, и измеряется термо-ЭДС. Далее электроды из хромеля сортируют на 4 группы: в первую входят термоэлектроды, которые в паре с платиновым показали максимальную термо-ЭДС, во вторую – несколько меньшую термо-ЭДС, в третью – еще более меньшую, в четвертую – минимальную термо-ЭДС. Такие же действия выполняют и с термоэлектродными из сплава алюмель. После сортировки электродов по группам осуществляется их объединение в пары. Хромелевые электроды из первой группы свариваются с алюмелевыми электродами из четвертой группы, второй – с третьей, третьей – со второй, четвертой – с первой.

4.3. Градуировка и поверка термопар

Основным назначением термопары является измерение температуры. Изменение температуры приводит к возникновению термо-ЭДС в электрической цепи, в которую входят электроды термопары. Таким образом, измерительный прибор, также входящий в электрическую цепь, определяет изменение термо-ЭДС (см. Глава 1.1). Но конечная цель – определить температуру. Соответственно, необходимо сопоставить конкретные значения термо-ЭДС конкретным значениям температуры. Шкала термоэлектрического термометра должна отображать градусы.

Термопары можно условно разделить на две группы:

- I. с номинальными статическими характеристиками преобразования (стандартные градуировки¹³);
- II. с индивидуальными градуировками (нестандартные градуировки).

13 Градуировка средств измерений

метрологическая операция, при помощи которой средство измерений снабжают шкалой или градуировочной таблицей (кривой). Отметки шкалы должны с требуемой точностью соответствовать значениям измеряемой величины, а таблица

(кривая) с требуемой точностью отражать связь эффекта на выходе прибора с величиной, подводимой ко входу (например, зависимость термо-ЭДС термопары пирометра от температуры её рабочего спая).

Для термопар, входящих в первую группу, определена стандартная зависимость термо-ЭДС от температуры. Данная зависимость регламентируется стандартом [ГОСТ Р 8.585-2001](#) «Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования». В стандартах данная зависимость представлена как номинальные статические характеристики преобразования (НСХ) значения термо-ЭДС, развиваемой термопарой, в соответствующее значение температуры. НСХ определяется экспериментально по результатам измерений в лаборатории, полученным для большого количества термопар. Измерения осуществляются при температуре свободных концов термопары, равной 0 °С. Термопары каждого типа обозначаются соответствующей буквой латинского алфавита. В зависимости от допускаемых отклонений термо-ЭДС, развиваемой термопарой при определенных температурах, выделяют классы точности (допуска) термопар.

Таблица 31. Пределы допускаемых отклонений термо-ЭДС от НСХ преобразования, выраженные в температурном эквиваленте для разных типов термопар в зависимости от диапазона рабочих температур

Обозначение промышленного термопреобразователя	Обозначение типа термопары	Класс допуска	Диапазон измерений, °С	Пределы допускаемых отклонений термо-ЭДС от НСХ ($\pm\Delta t$), °С
ТПП (платинородий – платина)	S, R	2	От 0 до 600 Св. 600 до 1600	1,5 0,0025t
		1	От 0 до 1100 Св. 1100 до 1600	1,0 1,0 + 0,003(t-1100)
ТПР (платинородий – платинородий)	B	3	От 600 до 800 Св. 800 до 1800	4,0 0,005t
		2	От 600 до 1800	0,0025t
ТХК (хромель – копель)	L	3	От -200 до -100 Св. -100 до +100	1,5+0,01 t 2,5
		2	От -40 до +360 Св. 360 до 800	2,5 0,7+0,005t
		1	От -40 до +375 Св. 375 до 800	1,5 0,004t
ТХА (хромель – алюмель)	K	3	От -250 до -167 Св. -167 до +40	0,015 t 2,5
		2	От -40 до +333 Св. 333 до 1300	2,5 0,0075t
		1	От -40 до -375 Св. 375 до 1300	1,5 0,004t
ТЖК (железо – константан)	J	2	От 0 до 333 Св. 333 до 900	2,5 0,0075t
		1	От -40 до +375 Св. 375 до 750	1,5 0,004t
ТВР (вольфрам/рений – вольфрам/рений)	A-1, A-2, A-3	3	От 1000 до 2500	0,007t
		2	От 1000 до 2500	0,005t

Для термопар с индивидуальными градуировками не существует зависимости термо-ЭДС от температуры, определяемой государственными стандартами. Для каждой термопары из данной группы необходимо проводить градуировку. Методы градуировки таких термопар совпадают с методами градуировки стандартных термопар. Примерами таких термоэлектрических преобразователей являются термопары вольфрам-молибден, вольфрам-тантал, карбид титана-графит и некоторые другие.

В силу различных факторов показания конкретной термопары могут отличаться от показаний, регламентированных стандартом (причины возникновения погрешностей измерений описаны в [Глава 1.4](#)). В связи с этим необходимо выполнять поверку термопар. Данная операция выполняется для новых термопар стандартных типов с целью определения их класса точности и с заданной периодичностью для всех термопар в процессе эксплуатации для контроля точности измерений. Для термопар стандартных типов поверка осуществляется в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 8.338-2002 «Преобразователи термоэлектрические. Методики поверки».

Выделяют четыре основных метода поверки термопар:

- I. метод непосредственного сличения;
- II. разностный (дифференциальный) метод;
- III. метод поэлектродного сличения;
- IV. по реперным точкам.

Метод непосредственного сличения [\[7\]](#)

В соответствии с методом непосредственного сличения температура в нагревательном устройстве, в котором находятся рабочие спаи эталонной и поверяемых термопар, определяется с помощью эталонной термопары, после чего измеряется термо-ЭДС, развиваемая поверяемыми термопарами. Нагрев печи должен происходить до заданной температуры с допуском отклонением не более ± 10 °С. Во время измерения термо-ЭДС поверяемых термопар температура рабочего спая (в печи) не должна меняться более, чем на 0,4 °С/мин. Данный метод применяется для поверки рабочих (технических) термопар.

Разностный (дифференциальный) метод [\[7\]](#)

Разностный метод дает более высокую точность по сравнению с методом непосредственного сличения. В данном методе измеряется разность термо-ЭДС между эталонной и поверяемой термопарами. Термо-ЭДС поверяемой термопары получается расчетным путем на основе измеренной разности термо-ЭДС и термо-ЭДС эталонной термопары. Данный метод применяется в том числе и для поверки эталонных термопар.

Метод поэлектродного сличения [\[8\]](#)

Метод поэлектродного сличения заключается в том, что при определенных температурах, устанавливаемых в нагревателе по показаниям эталонной термопары, измеряются термо-ЭДС между одноименными электродами эталонной и поверяемой термопар. На основе полученных значений термо-ЭДС вычисляют термо-ЭДС поверяемой термопары. Данный метод применяется, в том числе, и для поверки эталонных термопар.

Метод поверки в реперных точках [\[8\]](#)

Данный метод предусматривает поверку термопар в точках плавления (затвердевания) чистых металлов и применяется для поверки эталонных термопар высших разрядов.

В качестве реперных точек выбраны следующие точки:

- I. точка затвердевания меди (1084,620 °С);
- II. точка затвердевания алюминия (660,323 °С);
- III. точка затвердевания цинка (419,527 °С).

Соответствующий металл в твердом состоянии содержится в специальной ампуле. Ампула нагревается до температуры, на 10 °С превышающей температуру затвердевания металла. Через некоторое время после завершения нагрева, когда расплавленный металл начинает затвердевать, в ампулу вводят поверяемую термопару и осуществляют измерения термо-ЭДС. В каждой реперной точке проводят несколько измерений одной и той же поверяемой термопарой. Затем рассчитывают средние арифметические значения термо-ЭДС в каждой реперной точке. Если значения термо-ЭДС поверяемой термопары не соответствуют эталонным, то термопару отбраковывают или переводят в класс рабочих.

Эталонные значения термо-ЭДС термопреобразователей (термопар) в соответствующих реперных точках:

- I. точка затвердевания меди – 10574 ± 30 мкВ;
- II. точка затвердевания алюминия – 5860 ± 17 мкВ;
- III. точка затвердевания цинка – 3447 ± 14 мкВ.

Методы, применяемые для поверки эталонных термопар, обладают более высокой точностью по сравнению с методами, применяемыми для поверки рабочих термопар. Как правило, методы непосредственного сличения и разностный метод используют при поверке рабочих термопар, а методы по электродного сличения и в реперных точках – при поверке эталонных термопар.

В случае невыполнения требований поверки термопара отбраковывается или переводится в более низкий класс точности. Межповерочные интервалы (частота поверки) регламентируются нормативными документами (стандартами, техническими условиями и другими) для соответствующих типов термопар.

В данной статье рассмотрены различные аспекты, связанные с термопарами – назначение, принцип работы, типы, производство.

Термоэлектрические термометры, в основе которых лежат термопары, в настоящее время являются одними из самых распространенных средств измерения температуры. Об этом свидетельствует большое количество типов термопар, а также конструкций термоэлектрических термометров, описанных в данной статье.

Наличие локальных и международных стандартов, регламентирующих требования к термопарам, существенно упрощает их выбор и эксплуатацию.

Описание принципа работы термопары и процесса ее производства позволяет получить базовый набор знаний, полезный при непосредственной работе с термоэлектрическими термометрами.

Авторы надеются, что приведенный в статье материал будет интересен и полезен читателям. Свои замечания и предложения читатели могут присылать на адрес электронной почты:

info@metotech.ru

1. Измерение температуры: теория и практика. Гарсия Виктор. / Статья. Опубликовано в СТА: В записную книжку инженера. №1. 1999. — 82-87 сс.
2. Теплотехнические измерения и приборы. Учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов». / Преображенский В.П. — 3-е изд., перераб. — М.: «Энергия», 1978. — 704 с.: ил.
3. Поверка и калибровка термоэлектрических преобразователей. Зимин Г.Ф. / Учеб. пособие — М.: АСМС, 2001. — 48 с. — ISBN 5-93088-047-6.
4. Вольфрам. Свойства, применение, производство, продукция. Никонов Н.В. / Статья. — М.: Метотехника, 2012. — 23 с.: ил.
5. Молибден. Свойства, применение, производство, продукция. Никонов Н.В. / Статья. — М.: Метотехника, 2014. — 33 с.: ил.
6. [ГОСТ Р 8.585-2001](#) «Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования»
7. ГОСТ 8.338-2002 «Преобразователи термоэлектрические. Методики поверки»
8. ГОСТ Р 8.611-2005 «Преобразователи термоэлектрические платиноводород-платиновые эталонные 1, 2 и 3-го разрядов. Методика поверки»
9. «Термопара» [Электронный ресурс] // Википедия [Официальный сайт]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Термопара>
10. «Термометрия» [Электронный ресурс] // Яндекс словари [Официальный сайт]. URL: <https://slovari.yandex.ru/Термометрия/правописание/>
11. «Геттер (газопоглотитель)» [Электронный ресурс] // Википедия [Официальный сайт]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Геттер_\(газопоглотитель\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Геттер_(газопоглотитель))
12. «Газоплотность» [Электронный ресурс] // Энциклопедический словарь по металлургии [Официальный сайт]. URL: <http://metallurgicheskij.academic.ru/2094>
13. «Градуировка» [Электронный ресурс] // Википедия [Официальный сайт]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Градуировка>
14. «Градуировочные таблицы для термопар (НСХ)» [Электронный ресурс] // Информационный портал temperatures.ru [Официальный сайт]. URL: http://temperatures.ru/pages/gradirovочnye_tablicy
15. «Температурный коэффициент электрического сопротивления» [Электронный ресурс] // Википедия [Официальный сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Температурный_коэффициент_электрического_сопротивления
16. «Коэффициент теплового расширения» [Электронный ресурс] // Википедия [Официальный сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_теплового_расширения
17. «Ферромагнетизм» [Электронный ресурс] // Википедия [Официальный сайт]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ферромагнетизм>
18. «Парамагнетики» [Электронный ресурс] // Википедия [Официальный сайт]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Парамагнетики>

Николай Никонов

Термопары.

Типы, характеристики, конструкции, производство.

→ Другие статьи, посвященные металлам и сплавам, Вы можете найти на сайте www.metotech.ru

Подписано в печать 20.12.2015. Формат А4 / 210×297 мм.

ООО «МТК «МЕТОТЕХНИКА»
+7 (495) 504-95-54, +7 (495) 642-41-95
e-mail: info@metotech.ru
www.metotech.ru

Перепечатка материалов статьи невозможна без письменного разрешения редакции.