

ВОЛЬФРАМ-РЕНИЕВЫЕ ТЕРМОЗОНДЫ В ЛИТЕЙНОМ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВАХ

*А.А.Улановский, Обнинская Термоэлектрическая Компания
А.В.Куракин, Обнинская Термоэлектрическая Компания
М.С.Фрольцов, Брянский машиностроительный завод,
И.Л.Шкарупа, ГНЦ РФ «Обнинское НПП «Технология»*

Бурное развитие в последние годы бесконтактных методов термометрии, в том числе в литейном и металлургическом производствах, требуют высокой квалификации эксплуатационного персонала, учета возможных методических погрешностей, не всегда очевидных, например при измерении температуры расплава металла радиационным пирометром. Поэтому контактное измерение температуры расплава металла погружным методом сохраняет свое значение и сегодня. При этом возможные методические погрешности сводятся лишь к очевидным погрешностям наличия теплового равновесия между чувствительным элементом средства измерения температуры и рабочей средой, а также метрологической погрешности самого чувствительного элемента, нормируемой действующими стандартами.

В металлургическом производстве широко применяются термозонды на основе платинородиевых термопар типа ТПР-91 со сменными одноразовыми пакетами ПТПР /1/, которые защищены картонными гильзами с огнеупорной пропиткой. Чувствительным элементом зонда является термопара ПР30/6 с термоэлектродами диаметром 0,1 мм в защитной трубке из кварцевого стекла или колпачке для увеличения быстродействия. Быстродействие зонда очень важно, т.к. длительность замера температуры не превышает 5 -7 с, после чего защитная арматура одноразового пакета выходит из строя. Поэтому наличие теплового равновесия в конце замера является определяющим для достоверности данного замера. Любой брак в изготовлении одноразового пакета или разброс в геометрии защитных элементов термопары приводит к потере пакета или неоднозначности серии замеров. К достоинствам такого зонда можно отнести метрологическую точность платинородиевой термопары, которая оборачивается повышением стоимости одного замера и безвозвратной потерей драгоценного металла в процессе измерения (40÷50 руб./замер)

Предлагаются также термозонды аналогичной конструкции на основе одноразовых пакетов ПТВР с вольфрамрениевой термопарой ВР 5/20. Но они не получили широкого распространения, в основном, из-за сравнительно низкой (по сравнению с платинородиевыми термопарами) воспроизводимостью термоЭДС, обусловленной разбросом по содержанию рения в разных партиях проволоки и вынуждающей группировать термоэлектродные пары по группам с номинальными статическими характеристиками А-1, А-2, А-3 /2/. Кроме того, метрологическая аттестация катушек с термоэлектродной проволокой требует больших трудозатрат и калибровки термоэлектродов в вакуумной печи, т.к. вольфрамрениевая термопара не может длительно использоваться в окислительной среде из-за взаимодействия термоэлектродов с кислородом воздуха. При этом вольфрамрениевые термопары имеют самую высокую температуру применения, линейность номинальной статической характеристики этой термопары выше, чем у платинородиевых термопар (см. рис.1), что важно для воспроизводства НСХ термопары в цифровых вторичных приборах.

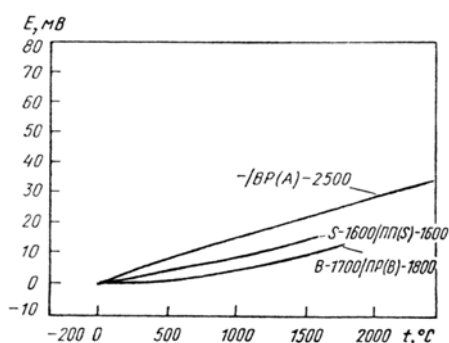


Рис.1 НСХ высокотемпературных термопар /3, с.7/

Дифференциальная чувствительность вольфрам-рениевой термопары в диапазоне от 1000 до 1500°C на 50-15% выше, чем у платинородиевой термопары, величина термоЭДС термопары

ВР5/20 при 1500°C вдвое выше /4/. Механическая же прочность проволоки выше в 10-15 раз. Допускаемые отклонения термоЭДС от НСХ вольфрамрениевой термопары по ГОСТ 6616-94 составляют $0,005 \cdot t$ или $0,007 \cdot t$ для 2 и 3 классов, соответственно /5/. Термоэлектрическая неоднородность и стабильность проволоки (до ± 50 мкВ при 1550 ± 20 °С) также вполне приемлемы для многих областей применений.

Вольфрамрениевые термопары хорошо зарекомендовали себя в термозондах для кратковременного измерения температуры расплавленных металлов в небольших печах литейного производства. Термозонд представляет собой «удочку» (рис.2), на рабочем конце которой находится горячий спай термопары. Термопару защищают чехлом из кварцевого стекла (1), устойчивого к термоудару. Чехол крепится на штанге термозонда (3) с помощью разрезной втулки (2). После каждого замера чехол заменяют, т.к. кварцевое стекло сильно деформируется при высокой температуре. Периодически заменяется и окисленный участок термоэлектродов вблизи рабочего спая термопары путем сматывания «свежей» проволоки с катушек зонда (4). Зонд подключен к щитовому вторичному прибору с помощью компенсационного кабеля.

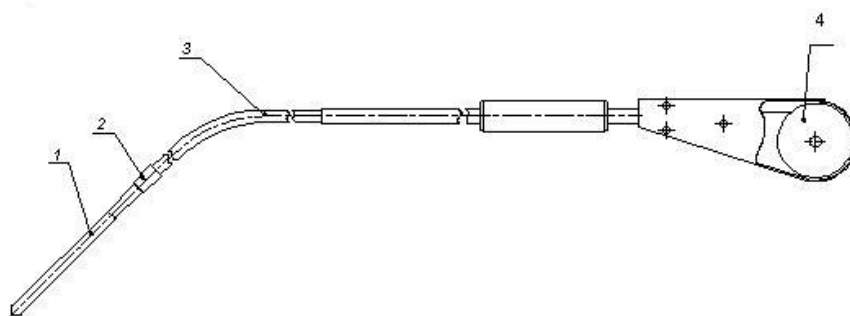


Рис.2 Термозонд с вольфрамрениевой термопарой для кратковременного измерения температуры расплава жидкого металла

В рамках Государственного контракта между Обнинской термоэлектрической компанией и Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (г.Москва) на проведение НИОКР по разработке конструкции и метрологического обеспечения первичных датчиков измерения температуры в диапазоне 1300÷2200°C авторами в 2005 году был разработан термозонд поплавкового типа с автономным показывающим прибором на основе вольфрамрениевой термопары (рис.3).

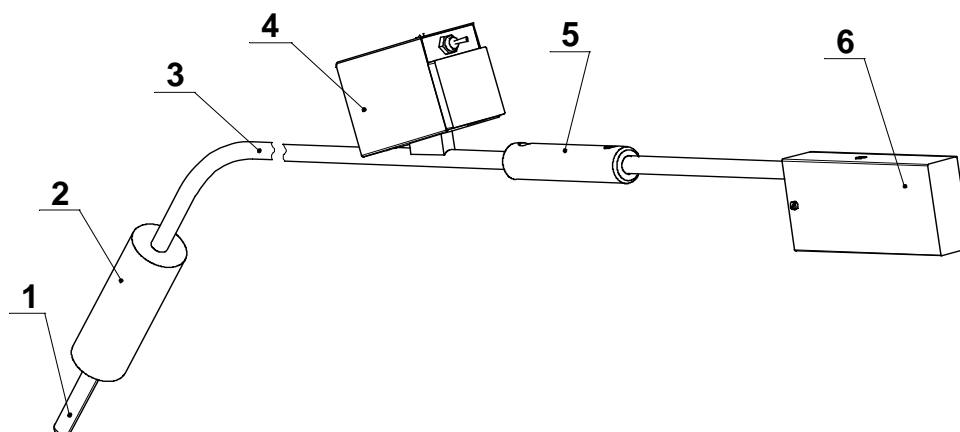


Рис.3 Термозонд поплавкового типа ПП-А 212П

- | | |
|----------------------------------|--|
| 1.- защитная пробирка термопары; | 4. - показывающий прибор; |
| 2. – поплавок; | 5. – ручка; |
| 3. – металлическая штанга; | 6. – коробка с катушками для запасной проволоки. |

Зонд состоит из штанги (3) с показывающим прибором (4), имеющим автономное питание +4,5 В, и поплавок (2) с рабочей пробиркой (1), защищающей «горячий» спай термопары в расплаве металла. Зонд свободно удерживается в руке оператора за ручку (5) с упором локтевого сустава на коробку (6). Задачей настоящей конструкции является обеспечение условий, при которых оператор, в условиях недостаточной видимости рабочего конца зонда при ярком свечении зеркала расплава металла, не может случайно погрузить зонд в расплав на чрезмерную глубину, при которой происходит соприкосновение металлической части арматуры с расплавом. Это ведет к разрушению металлической арматуры и выведению зонда из строя.

Упрощенно зонд можно представить в виде балки с одной осью вращения (локтевой сустав оператора). Балка имеет свой собственный вес и дополнительный груз (поплавок с пробиркой), подвешенный на ее конце (рис.4). Распределение сил, действующих на зонд, представлено там же. Упрощенно принимая собственную массу зонда с поплавком и пробиркой сосредоточенной в одной точке, сила тяжести F , действующая на рабочий конец зонда равна:

$$F = Mg, \quad \text{где } M - \text{общая масса зонда; } g - \text{ускорение свободного падения}$$

Для обеспечения плавучести зонда в расплаве архимедова сила F_A , действующая на поплавок, погруженный в расплав, должна быть не меньше силы тяжести:

$$F_A = \rho \cdot V \cdot g \geq F, \quad \text{где: } \rho - \text{плотность расплава металла; } V - \text{объем поплавок и защитной пробирки.}$$



Рис.4. Схема термозонда, погруженного в расплав, и силы, действующие на поплавок

Таким образом, положительная плавучесть поплавок будет выполняться при условии, когда объем поплавок и защитной пробирки будет больше массы зонда, поделенной на плотность расплава металла : $V \geq M/\rho$

Соответственно, чем меньше плотность материала поплавок, тем меньше будет его масса, и положительная плавучесть будет достигаться при меньшем объеме поплавок. Точно также, чем выше плотность расплава металла, тем меньший объем поплавок необходим для положительной плавучести. В этих условиях даже небольшое усилие со стороны оператора, противодействующее силе тяжести, обеспечит гарантированную положительную плавучесть в расплаве поплавок и зонда в целом.

Изготовление термозонда с поплавком дает и дополнительное преимущество измерения температуры металла на большей глубине, чем при измерении температуры термозондом, в котором термопара защищается только защитной пробиркой длиной 120-140 мм. Глубина погружения термопары в расплав не будет превышать 70-80 мм из-за опасности «клюнуть» рабочим концом зонда в расплав на недопустимую глубину. При измерении температуры с поплавком глубина погружения также будет постоянной от замера к замеру, что увеличивает стабильность показаний при последовательных замерах температуры. При этом отпадает необходимость оператора постоянно контролировать и регулировать глубину погружения в процессе замера, устраняется опасность выхода термозонда из строя при случайном «клевке» погружной части термозонда в расплав на чрезмерную глубину. Простота конструкции термозонда и получение результатов измерений в виде значений температуры, выраженных в градусах Цельсия, не требует специальной подготовки оперативного персонала для эксплуатации и текущего обслуживания термозонда.

Основой данной конструкции является поплавок, изготовленный из термостойкой керамики или графита, и уплотненная в поплавке защитная пробирка, допускающая многократные

погружения в расплав. Пробирка изготовлена из модифицированной кварцевой керамики (аморфный кремнезем) по специальной запатентованной технологии Обнинского НПП «Технология». Испытания термозондов производства Обнинской термоэлектрической компании (см.рис.5) в расплавах стали, показали, что защитная пробирка из модифицированной кварцевой керамики выдерживает от 20 до 30 погружений в расплав на время до 40-60 с при температуре 1500°C и до 10 погружений при температуре 1700°C. Одновременные замеры температуры двумя термозондами показали расхождения в показаниях на 1 ± 2 градуса. Замена рабочего спая и близлежащего участка термоэлектродов требовалась через 5-10 измерений, при этом дрейф термоЭДС не превышал 4-8 градусов. Аналогичные результаты приведены в /3, с.39/, когда термопары ВР5\20 при кратковременном погружении в расплав металла зарекомендовали себя не хуже платинородиевых. Термозонд полностью автономен (питание =4,5В) и имеет цифровой индикатор температуры класса точности 0,25. Прибор фиксирует максимальное значение температуры, достигнутое в процессе замера, которое может быть затем занесено оператором в рабочий журнал. В процессе измерения температуры оператор может самостоятельно оценить время наступления теплового равновесия между термопарой и рабочей средой по стабилизации показаний прибора. Обычно оно не превышает одной минуты. При этом защитная пробирка остается в рабочем состоянии, что и определяет высокие эксплуатационные характеристики термозонда.



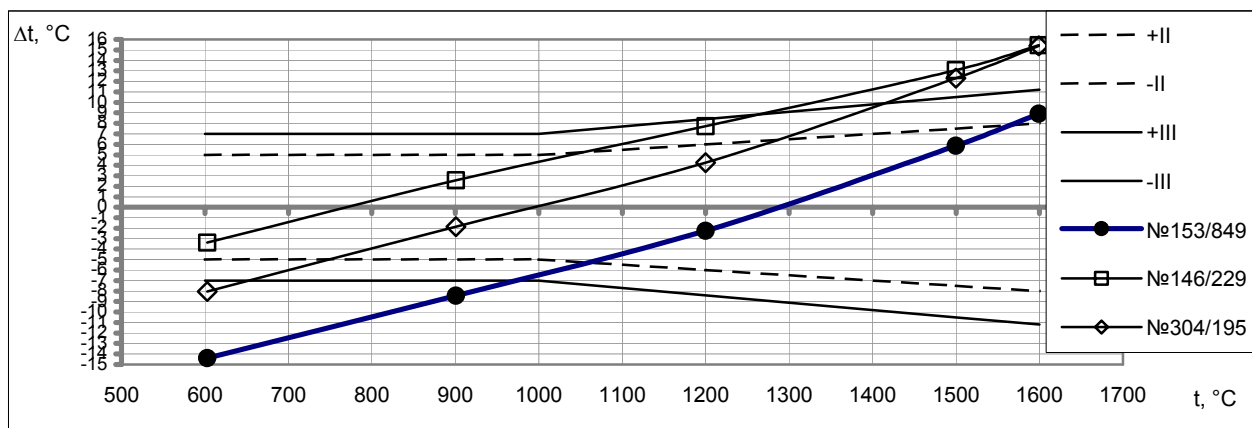
Рис.5 Измерение температуры расплава металла в индукционной печи с помощью термозонда ТП-А 212

Данная конструкция позволяет изготавливать как небольшие термозонды для контроля температуры расплава в индукционных печах, так и специальные термометрические штанги длиной до 3 м для контроля температуры расплава в сталеразливочных ковшах. При этом стоимость простого термозонда для индукционной печи не превышает стоимости обычной платинородиевой термопары монтажной длиной 1000 мм. Первые макетные и опытные образцы работают уже два года. В настоящее время ведутся производственные испытания термозондов на Брянском машиностроительном заводе с целью определения рабочего ресурса.

Проведенные испытания термозондов показали перспективность патентования данного конструктивного решения в качестве объекта интеллектуальной собственности. Итогом этих работ стал патент на полезную модель /6/. Термозонды в составе общепромышленных вольфрамрениевых термопреобразователей ТП-А внесены в Государственный реестр средств измерений.

Важной составной частью данных исследований являлась разработка и утверждение методики первичной поверки вольфрамрениевых термопар, предназначенных для эксплуатации в качестве чувствительного элемента общепромышленных термопреобразователей. Данная методика также описывает правила метрологической аттестации скомплектованных пар термоэлектродной вольфрамрениевой проволоки. При этом все метрологические работы выполняются на воздухе в высокотемпературной печи (до 1750°C) с использованием герметичных чехлов из высококачественной оксидной керамики, заполненных инертным газом. Метрологическая аттестация позволяет отобрать проволоку, наиболее пригодную для термозондов, и преодолеть недостаток низкой воспроизводимости термоЭДС, который ограничивал применение вольфрамрениевых термопар. Как показывают первые метрологические исследования, эта проблема очень важна. Метрологические характеристики двух пар

термоэлектродных проволок одной градуировки могут значительно отличаться (рис.6), хотя и быть в пределах допускаемых отклонений. Каждую бухту можно рекомендовать для определенного рабочего диапазона температур.



\pm II, \pm III - верхний и нижний допуски отклонения термоЭДС от НСХ (ось абсциссе) для 2 и 3 класса.
 №..... – номера скомплектованных пар катушек термоэлектродной проволоки.

Рис.6 Различие калибровочных характеристик термопар ВР 5/20 относительно НСХ для разных пар катушек термоэлектродной проволоки $\varnothing 0,35$ мм градуировки А-1 заводской комплектации, 2005 года выпуска.

Термоэлектродная проволока диаметром 0,5 мм метрологически более стабильна и имеет меньшие отклонения от НСХ (рис.7). Однако и выход годной проволоки из производства для диаметра 0,5 мм существенно меньше, чем для проволоки диаметром 0,35 мм.

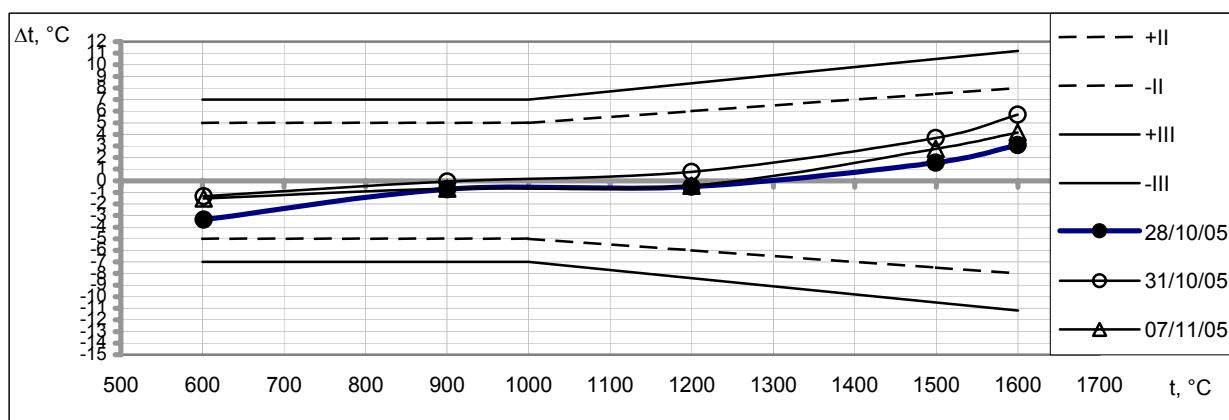


Рис.7 Изменение калибровочной характеристики термопары ВР 5/20 градуировки А-1 (ТП-А, зав.№2100) относительно НСХ при трех последовательных испытаниях. (термоэлектроды диаметром 0,5 мм)

Выше приведенные данные показывают, что использование некоторых бухт вольфрамрениевой проволоки только на основании заводского паспорта по указанной градуировке может привести к значительной погрешности в измерениях, т.к. определение градуировки производится в одной точке при 1500°C . Возможный брак продукции при использовании неаттестованной проволоки может создать у потребителя мнение о непригодности вольфрамрениевой термопары для кратковременных измерений температуры в окислительной среде, хотя это далеко не так /7/.

В заключение можно сказать, что вольфрамрениевая термопара и термозонды на ее основе имеют технический потенциал, который в настоящее время используется далеко не полностью. Термозонды на основе метрологически аттестованной вольфрамрениевой проволоки могут составить достойную конкуренцию платинородиевым термозондам. Как показывает первый опыт, надежные конструкции вольфрамрениевых термозондов возможны, условия для их серийного производства и метрологического обеспечения имеются.

Список использованных источников:

1. ОАО «Челябинский завод «Теплоприбор». Номенклатурный каталог, часть III. «Приборы и устройства для экспресс-анализа расплавов.»
2. СУО.021.142 ТУ. Проволока из сплава вольфрама с рением отожженная градуированная для термоэлектродов термопар. Технические условия.
3. И.П.Куритнык, Г.С.Бурханов, Б.И.Стаднык Материалы высокотемпературной термометрии. М.,Металлургия, 1986.
4. Государственный стандарт РФ ГОСТР 8.585-2001. ГСОЕИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. Москва, изд-во стандартов, 2002.
5. Межгосударственный стандарт ГОСТ 6616-94. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. Минск, изд-во стандартов, 1998
6. Заявка о выдаче патента на полезную модель №2005120961 от 06.07.2005 г. Термозонд для металлургических печей. Авторы Улановский А.А., Фрольцов М.С., Шкарупа И.Л. Решение ФИПС о выдаче патента от 01.11.2005 г.
7. А.А.Улановский Термометрия: забытые возможности вольфрамрениевых термопар. Ж. Интеграл, №2(22), март-апрель 2005 г., с.36-38.