

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ВОЛЬФРАМРЕНИЕВЫЕ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

Для контактного измерения температуры рабочей среды в диапазоне 1300÷2000°C ГОСТ 6616-94 [1] предусматривает использование двух типов термопар, представленных в табл.1.

Таблица 1

Тип термопары	Букв. обозн. НСХ	Химический состав термоэлектродов, мас.%		Пределы измеряемых температур, °С	
		«+»	«-»	Диапазон	Кратковременно
Платинородий-платинородиевая ТПР 30/6	В	Pt+30%Rh	Pt+6%Rh	600÷1700	–
Вольфрамений-вольфрамениевые ТВР 5/20	А-1;	W+5%Re	W+20%Re	0÷2200	2500
	А-2;			0÷1800	–
	А-3			0÷1800	–

В таблице 2 приведены рекомендуемые рабочие атмосферы для применения приведенных выше типов термопар [2, с.34], а также их дифференциальная чувствительность и пределы допускаемых отклонений термоЭДС от номинальной статической характеристики (НСХ) по ГОСТР 8.585-2001 в указанных диапазонах температур [3].

Таблица 2

Тип термопары	Рабочие атмосферы				Чувствительность и пределы допускаемых отклонений от НСХ в диапазоне температур		
	Окислительная	Восстановительная	Инертная	Вакуум	диапазон, °С	dE/dt; мкВ/К	±Δt, °С
ТПР (В)	++	–	+	+	1000÷1700	9,2 ÷ 11,6	0,0025·t для 2 кл. 0,005·t для 3 кл.
ТВР (А)	–	H ₂ ++	++	++	1000÷1800	15,5 ÷ 11,4	0,005·t для 2 кл. 0,007·t для 3 кл.

Примечания: ++ рекомендуемая атмосфера; – не рекомендуемая атмосфера.
+ эксплуатация в данной атмосфере возможна; t – температура, °С

К достоинствам платинородиевой термопары можно отнести хорошее сопротивление газовой коррозии при высоких температурах в окислительных средах, технологичность, воспроизводимость метрологических свойств. Платинородиевый сплав устойчив в аргоне и гелии, не растворяет азота и водорода и не образует нитридов и гидридов, не взаимодействует с СО и СО₂. Малая чувствительность термопары ТПР в диапазоне 0÷100°C делает возможным применение ее с медными удлинительными проводами.

К недостаткам всех термопар из драгоценных металлов можно отнести невозможность их длительного применения в восстановительных атмосферах, т.к. в этом случае происходит загрязнение платинородиевых сплавов элементами, восстановленными из защитной или изолирующей керамики. Их термоэлектроды вообще чувствительны к любым загрязнениям, появившимся при изготовлении, монтаже или эксплуатации термопар. Кроме того, при

высоких температурах, особенно в вакууме, заметен также перенос паров родия с положительного термоэлектрода (30%Rh) на отрицательный, что понижает термоЭДС термопары. И конечно, общеизвестны их высокая стоимость и дополнительные расходы по организации учета и хранения драгоценных металлов. Последние два года наблюдается непрерывный рост цен на эти металлы, в т.ч. на платину – 23%, на родий – почти в 6 раз.

В этих условиях заслуживающей пристального внимания, по-нашему мнению, является вольфрамениевая термопара ТВР (далее ВР термопара), которая только в России внесена в государственный стандарт. В международных стандартах ВР термопар нет, хотя они широко применяются в промышленности. ВР термопары имеют самую высокую температуру применения, но могут использоваться только в инертной газовой и водородной среде или в вакууме (см.табл.2), т.к. взаимодействие с кислородом воздуха начинается при температуре выше 300°C, а при 500-600°C термоэлектроды дымно «горят».

Основной недостаток – сравнительно низкая (по сравнению с платинородиевыми термопарами) воспроизводимость термоЭДС, обусловленная разбросом по содержанию рения в разных партиях проволоки. Это вынуждает группировать термоэлектродные пары по группам с номинальными статическими характеристиками А-1, А-2, А-3 [4]. Но нужно отметить, что линейность номинальной статической характеристики этой термопары выше, чем у платинородиевых термопар, что важно для воспроизводства НСХ термопары в цифровых вторичных приборах. Кроме того, как видно из табл.2, дифференциальная чувствительность ВР термопары до 1500°C на 50-30% выше, чем у платинородиевой термопары. Механическая же прочность проволоки выше в 10-15 раз. Допускаемые отклонения термоЭДС от НСХ вольфрамениевой проволоки и ее термоэлектрическая неоднородность [5] вполне приемлемы для многих областей применений.

Стабильность ВР термопар также приемлема в пригодных для их эксплуатации средах. Материалы исследований стабильности [5÷9] свидетельствуют о том, что наибольшие изменения термоЭДС происходят в первый час работы (до 1%), в атмосфере чистого аргона показания наиболее стабильные. Отжиг термопар в условиях высокого вакуума ($\sim 10^{-6}$ Па) приводит к резкому отрицательному дрейфу термоЭДС с ростом температуры (5 и 180 градусов за 500 ч при температуре 1930°C и 2130°C, соответственно) [7]. Это происходит вследствие большой (до 20%) потери рения в обоих термоэлектродах термопары. Поэтому в условиях вакуума термоэлектроды необходимо защищать, чтобы уменьшить испаряемость рения. Длительные измерения температуры оголенными термоэлектродами в условиях глубокого вакуума возможны лишь до 1950°C. Стабильность термопар также зависит от структуры термоэлектродных сплавов [5], их металлургической и термической предисторий, в частности, от качества предварительного отжига, проведенного изготовителем проволоки.

Согласно рекомендациям Международного бюро мер и весов [11], в диапазоне 1000-2000°C возможно получить высокую точность калибровки вольфрамениевой термопары по точкам затвердевания золота, никеля, палладия, платины и родия с погрешностью аппроксимирующего полинома от 2,7 до 7,0 градусов Кельвина для начала и конца диапазона, соответственно. Это в 1,5÷2 раза лучше, чем точность, предъявляемая к термопаре ВР5/20 по ГОСТ-6616-94.

ВР термопары широко применяются для измерения температуры в вакуумных и водородных электропечах, а также для кратковременных замеров температуры расплавленного металла в металлургии.

В рамках Государственного контракта на проведение НИОКР по разработке конструкции и метрологического обеспечения первичных датчиков измерения температуры в диапазоне 1300÷2200°C авторы попытались определить возможности и условия для

значительного расширении области применения ВР термопар. Были разработаны технические условия на их изготовление, термопреобразователи ТП-А внесены в Государственный реестр средств измерений, утверждена методика аттестации термоэлектродных материалов и первичной поверки вольфрамрениевых термопар, предназначенных для эксплуатации в качестве чувствительного элемента общепромышленных термопреобразователей.

Предварительный анализ и результаты первых испытаний показали, что расширение области применения ВР термопар вполне возможно. Но серьезного увеличения объема потребления вольфрамрениевых термопреобразователей можно добиться при условии их использования в окислительной среде, а также увеличения их рабочего ресурса в вакууме и восстановительных средах при температуре до 1700°C (при более высоких температурах они вне конкуренции). Для этого необходима очень хорошая защита термоэлектродов от воздействия среды. Защитный чехол должен быть герметичным и заполнен сухим, чистым инертным газом. Как уже отмечалось, наибольшая стабильность термоЭДС ВР термопары наблюдалась в чистом аргоне.

Герметичные ВР термопары во многих случаях можно предложить для замены термопар из драгоценных металлов. Стоимость этих термопреобразователей будет от 1,5 до 5 раз ниже, в зависимости от вида защитной арматуры. Кроме того, при температурах ниже верхних пределов применения термопар из драгоценных металлов стабильность ВР термопар не вызывает сомнений. По данным [5] дрейф термоЭДС при температурах до 1700°C находился в пределах погрешности измерений. Из работ, посвященных исследованию стабильности ВР термопар, работу [5] можно отнести к самым достоверным, т.к. дрейф термоЭДС определялся в рабочих условиях отжига при неизменном профиле температуры по длине термопары. При этом проводился металлографический контроль структуры металла термоэлектродов до и после отжига. Полная рекристаллизация вольфрамрениевых сплавов завершается при температуре 1700-1750°C, выше которой изменения структуры металла становятся заметными, что приводит к дрейфу термоЭДС термопары.

Наружный чехол вольфрамрениевого термопреобразователя может быть металлическим или керамическим. Для металлического чехла используется молибден (вакуум, водородные и инертные среды). Термопары в молибденовом чехле с защитным покрытием из дисилицида молибдена могут применяться в щелочной среде для измерения температуры расплава жидкого стекла [6]. В работе [12] сообщалось, что в графитсодержащих средах лучшую стойкость показал защитный чехол из сплава молибдена с цирконием МЦ-10.

Керамический чехол должен сохранять герметичность в течение рабочего ресурса в широком диапазоне температур. На эту роль годится только монокристаллический оксид алюминия -лейкосапфир, хотя на уровне температур 1000-1300°C герметичной может быть и другая керамика, а также кварцевое стекло. Полезно также защитное покрытие поверхности термоэлектродов. В рамках проводимых исследований была разработана и запатентована конструкция герметичного вольфрамрениевого термопреобразователя [13]. Общий вид термопреобразователя представлен на рис.1, и он практически не отличается от общепромышленных термопреобразователей, представлен стандартным типоразмерным рядом исполнений.



Рис.1 Герметичный вольфрамрениевый термопреобразователь

Для испытаний были изготовлены опытные образцы вольфрамрениевых термопар в чехлах из лейкосапфира. Первые результаты показали, что даже простое помещение ВР термопары в защитный чехол внутри вакуумной камеры спекания твердых сплавов ($1400\div 1450^{\circ}\text{C}$), без герметизации чехла, - увеличивает ее срок службы в десятки раз.

Успешны были результаты испытаний герметичного термопреобразователя в вакуумной камере-реакторе для силицирования и термообработки углеродных композитных материалов. Цикл термообработки длится около 12 ч, выдержка 2,5 ч при максимальной температуре до 1750°C , разрежение порядка 4000 Па. Электронагреватель и теплозащитные экраны из графита. Недостаточная защита ВР термопары приводила к выходу ее из строя при первом же выходе на предельные температуры. Используя наши конструктивные решения был разработан и изготовлен термопреобразователь монтажной длиной 1660 мм (рис.2).



Рис.2. Герметичный вольфрамрениевый термопреобразователь для монтажа в вакуумной камере.

Термопреобразователь помещался в дополнительный защитный чехол из углеродного композитного материала УКМ и устанавливался внутри рабочего пространства камеры на удалении 20 мм от поверхности графитового нагревателя. Термопреобразователь выдержал 6 циклов термообработки. Этот результат свидетельствует об устойчивости лейкосапфира в условиях высокого углеродного потенциала рабочей среды. Максимальная рабочая температура применения лейкосапфира достигает 1950°C , что достаточно для большинства применений.

Положительны результаты испытаний вольфрамрениевых термопреобразователей в окислительной среде. Два герметичных термопреобразователя отработали 900 и 1500 ч при температуре 1400°C в печи обжига огнеупоров до появления течи в узле герметизации лейкосапфирового чехла, после ремонта испытания продолжены.

Перспективно применение вольфрамрениевых термопреобразователей в стекловаренных печах. Особо агрессивная атмосфера печей ведет к сравнительно быстрому разрушению защитной арматуры термопреобразователя и выходу из строя термопары из платинородиевых сплавов. Причем очень часто разрушение защитной арматуры ведет к безвозвратной потере драгоценного металла в расплаве стекломассы. В этих условиях применение вольфрамрениевого термопреобразователя вполне оправдано, т.к. его ресурс будет определяться только стойкостью защитной арматуры. А стоимость ВР термопары в 20 раз меньше платинородиевой.

Два вольфрамрениевых термопреобразователя в двойном защитном чехле, наружный из газоплотного корунда, внутренний из лейкосапфира, - были установлены на свод стекловаренной печи с расплавом борного стекла при температуре $1570\div 1580^{\circ}\text{C}$, режим работы непрерывный. Атмосфера печи представляла собой смесь паров борного ангидрида, соды кальцинированной, калиевой селитры и оксида кремния при избыточном давлении 2-3 м водяного столба. Оба термопреобразователя выдержали один месяц работы до полного разрушения защитной арматуры. На фотографиях рис.3 видны следы активной коррозии наружного корундового чехла, имеются трещины по поверхности. Рабочий конец чехла, по-

видимому, полностью разрушился. Оксидная керамика имеет, конечно, ограниченную стойкость в атмосфере стекловаренной печи. Тем не менее, в течение одного месяца, в экстремальных условиях эксплуатации, термопреобразователи сохраняли свою работоспособность. В этих условиях платинородиевая термопара вышла бы строя за такой же срок, если не раньше, т.к. она более чувствительна к загрязнению металла термоэлектродов. При этом потеря части термоэлектродов была бы неизбежной.



Рис.3 Термопреобразователь ТП-А после 1 мес. испытаний в стекловаренной печи (борное стекло, температура 1570-1580°C)



Рис.4 Термопреобразователь ТП-А после 3 мес. испытаний в стекловаренной печи (бутылочное стекло, температура ~1500°C)

Еще один термопреобразователь в двойном защитном чехле (корунд-лейкосапфир) был установлен на стекловаренную печь, предназначенную для варки стекла бутылочной тары. Режим работы непрерывный, номинальная температура около 1500°C. Термопреобразователь выдержал три месяца непрерывной работы до разрушения наружного защитного чехла. Визуальным осмотром оставшейся части наружного и всего внутреннего чехла не было обнаружено значительных следов химического взаимодействия материала чехла с атмосферой печи (рис.4). Чехол мог разрушиться от термоудара при возможном попадании в пламя газовой горелки печи. Любая трещина во внутреннем чехле приводит к его разгерметизации и разрушению термоэлектродов, что и произошло в данном случае. Без такого воздействия термопреобразователь мог бы работать еще длительное время в отличие от предыдущего случая, когда произошло химическое разрушение чехла.

Использование электронных вторичных приборов с выносным компенсатором холодного спая термопары, размещенным в головке термопреобразователя, поможет преодолеть потребителю трудности с закупкой специальных компенсационных проводов типа М-МН2,4 для ВР термопар. В головке термопреобразователя также может быть размещен токовый преобразователь 4...20 мА с входной характеристикой для термопары ВР5\20. Оба эти решения позволят обойтись без компенсационных проводов.

ВР термопары хорошо зарекомендовали себя и для кратковременного измерения температуры расплавленных металлов в окислительных средах. В этом случае термопары защищают чехлом, устойчивым к многократным термоударам. Испытания термопар, проведенные с помощью специальных термозондов (рис.5) в расплавах стали, показали, что защитный чехол из модифицированной кварцевой керамики (аморфного кремнезема) 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 (рис.6). 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 [8, 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. Возможно изготовление как небольших термозондов для контроля температуры расплава в индукционных печах, так и специальных термометрических штанг длиной до 3 м для контроля температуры в сталеразливочных ковшах.

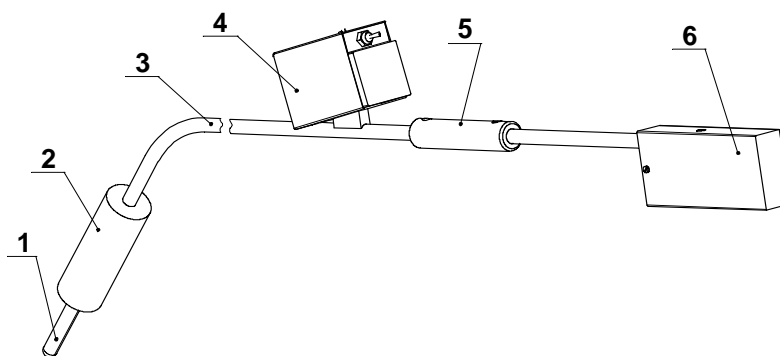


Рис.5 Термозонд поплавкового типа с вольфрамрениевой термопарой для кратковременного измерения температуры расплава жидкого металла

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

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. Данная конструкция также защищена патентом на полезную модель [14].



Рис.6 Измерение температуры расплава металла в индукционной печи с помощью термозонда

Вышеуказанные успехи в разработке вольфрамрениевых термопреобразователей, работоспособных в различных агрессивных средах, были бы нивелированы отсутствием надежного метрологического контроля при выпуске термопреобразователей из производства. В настоящее время в перечне метрологических стандартов, касающихся методики поверки вольфрамрениевых термопреобразователей, авторам удалось обнаружить только один документ –МИ 1745-87 [15]. Он описывает методику выполнения измерений и нормирует достигаемую точность измерений при аттестации стандартных образцов вольфрамрениевых термоэлектродных материалов. В соответствии с данной методикой, определение метрологических характеристик и стабильности термоэлектродных материалов необходимо проводить в специальной вакуумной печи методом поэлектродного сличения эталонного и рабочего термоэлектродов, на разных уровнях температур в диапазоне 1000-2500°С. Такие работы очень трудоемки, длительны и, в конечном итоге, слишком дороги. Стоимость аттестации бухты скомплектованных в пару термоэлектродных проволок ВР5 и ВР20 может в 3-5 раз превышать стоимость самих материалов. Для серийного производства термоэлектрических преобразователей данного типа подобный способ метрологической аттестации мало эффективен.

В ходе работ авторами была разработана оригинальная методика поверки вольфрамрениевых термопар для термопреобразователей общепромышленного исполнения. Доказанная возможность работы герметичных вольфрамрениевых преобразователей в окислительной среде длительное время позволяла использовать для поверки обычные печи сопротивления, работающие на воздухе. Т.к. верхний диапазон применения термопреобразователей ограничен возможностями защитной арматуры (1950°С для лейкосапфира), то возможности печей сопротивления (1750°С на воздухе) вполне достаточны для определения метрологических характеристик термопреобразователей подавляющего числа исполнений. Линейность статической характеристики ВР термопары позволяет, при необходимости, экстраполировать калибровочную кривую за верхний предел калибровки и оценить термоЭДС, скажем, при 1900°С без большого ущерба для точности. Кроме того, в диапазоне температур 1000-1700°С в качестве эталонного средства измерения можно использовать стандартную эталонную термопару платинородий30-платинородий6 типа ПРО и

проводить поверку методом сравнения показаний эталонной и рабочей термопары, как это рекомендует ГОСТ 8.338-2002 [16] для других типов термопар.

В результате на основе МИ 1745-87 и ГОСТ 8.338-2002 была разработана методика поверки, упрощающая процедуру аттестации термоэлектродных материалов для изготовления вольфрамрениевых термопреобразователей ТП-А. Методика поверки была утверждена ВНИИМС (г.Москва) и рекомендована к применению при выпуске из производства преобразователей термоэлектрических типа ТП-А, а также при аттестации термоэлектродных материалов. Результаты исследований метрологических характеристик вольфрамрениевых термопреобразователей показали принципиальную возможность метрологической поверки и детальной градуировки ВР термопар на воздухе. Температурный ход печи сопротивления с нагревателем из хромита лантана (рис.7) при выходе в режим измерения термоЭДС оказался в 10 раз ниже стандартных требований, предъявляемых к вакуумным печам по МИ 1745-87. Он всегда укладывался в требования ГОСТ 8.338-2002 для метрологических печей сопротивления типа МТП-2М с температурным ходом не более 0,4 град/мин в режиме измерения термоЭДС. Применение данной методики показало достоверность калибровки метрологических характеристик вольфрамрениевых термопреобразователей и продемонстрировала простой способ аттестации термоэлектродных материалов, который более приемлем для потребителей, использующих их при температурах до 1800°C. Он, как минимум, втрое дешевле аттестации в вакуумной печи.

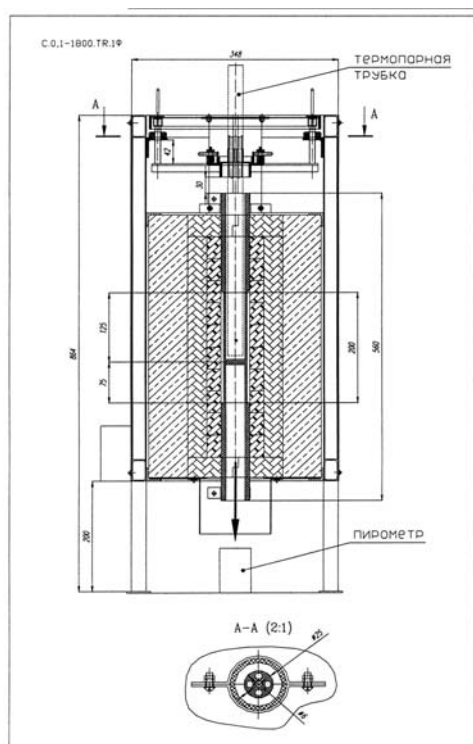


Рис.7 Разрез высокотемпературной градуировочной печи

Некоторые результаты градуировки ВР термопар приведены на рис.8. На нем представлены отклонения Δt термоЭДС термопар с диаметром электродов 0,35 мм от номинальной статической характеристики (НСХ) термопары ВР в диапазоне температур 600÷1600°C при трех последовательных калибровках, в том числе включая двухчасовой отжиг на температуре 1500°C при третьей калибровке. Третья калибровочная кривая практически совпадает с исходной калибровкой. Все термопары показали высокую стабильность термоЭДС. ТермоЭДС всех термопар при отжиге возрастала, дрейф составил +11÷13 мкВ, что не превышает 1,0 градуса. Однако видно, что существует значительный

наклон кривых относительно оси абсцисс (НСХ), составляющий от 10-13 градусов отклонения термоЭДС на 500 градусов изменения температуры печи от 1100 до 1600°C. При низких (до 1000°C) температурах отклонение термоЭДС от номинальных значений, в основном отрицательное. Затем, с ростом температуры калибровочные кривые пересекают область допускаемых отклонений от нижних границ до верхних предельных значений, и даже выходят за них. Это подтверждает трудности изготовления метрологически годной термопарной вольфрамрениевой проволоки и последующего ее отбора в пары. Для проволоки диаметром 0,5 мм выход годной продукции составляет всего 30%, но при дальнейшем волочении проволоки до меньших диаметров выход годной продукции увеличивается. При этом, как видно по рис.8, рабочий диапазон, в котором проволока соответствует требованиям ГОСТ 6616-94, может сужаться до нескольких сотен градусов, хотя стабильность термопары может быть хорошей. Эти данные показывают, что использование бухт вольфрамрениевой проволоки только на основании заводского паспорта по указанной градуировке может привести к значительной погрешности в измерениях. Определение градуировки пары бухт проволоки производится на заводе обычно в одной точке при 1500°C. Возможный брак продукции при использовании неаттестованной ВР проволоки может сформировать у потребителя мнение о ее низких метрологических характеристиках, хотя это далеко не так.

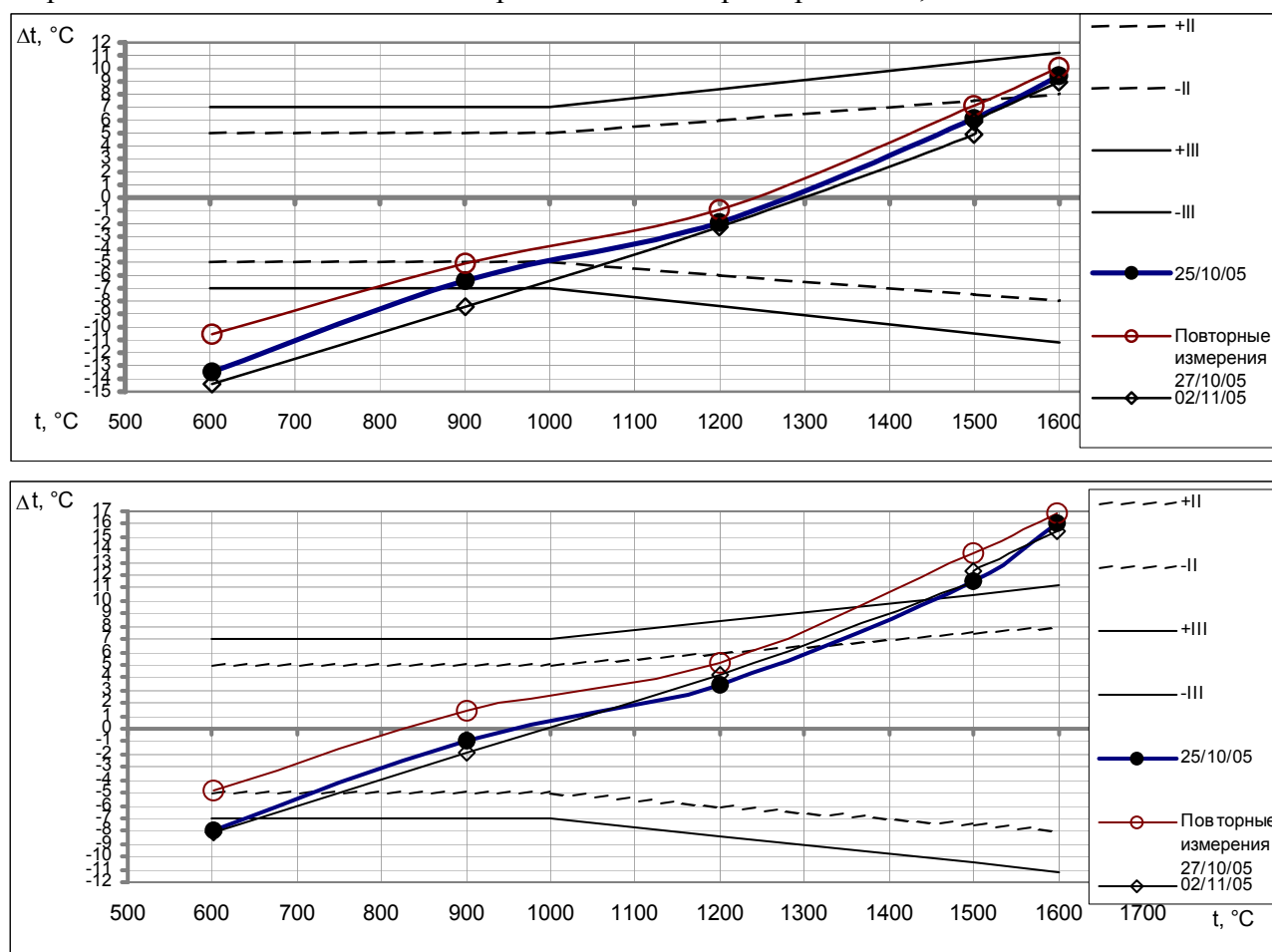


Рис. 8 Изменение калибровочной характеристики термопар ВР 5/20 относительно НСХ (заводская комплектация 2005 г.в., термоэлектроды $\varnothing 0,35$ мм, гр. А-1)

$\pm II$, $\pm III$ - верхний и нижний допуски отклонения термоЭДС от НСХ (ось абсцисс) для 2 и 3 класса, соответственно, по ГОСТ 6616-94.

25/10/05 – исходная калибровочная кривая отклонения термоЭДС термопар от НСХи.

Аналогичные калибровки были проведены для вольфрамрениевой термопары с термоэлектродами диаметром 0,5 мм, загерметизированной внутри чехла из лейкосапфира. Результаты калибровки оказались идеальными (рис.9), калибровочная кривая термопары оказалась внутри пределов допустимых отклонений термоЭДС от НСХ для 2-ого класса во всем диапазоне измерений. Наклон кривых относительно оси абсцисс очень мал, 3-4 градуса на 600-700 градусов нагрева печи, что, как минимум, втрое меньше наклона кривых для термопар диаметром 0,35 мм. Термопара соответствует ГОСТ 6616 во всем диапазоне измерений. Внешний вид термопары внутри прозрачного лейкосапфирового чехла практически не изменился, термопара работоспособна. Кривая повторной калибровки прошла чуть выше первой, дрейф термоЭДС составил +2 градуса при 1500°C и +3 градуса при 1600°C. В течение двухчасового отжига при 1500°C третьей калибровки дрейф термоЭДС оказался минимален, всего 3-4 мкВ, третья калибровочная кривая практически совпадает с исходной калибровкой. Испытуемая термопара оказалась идеальным средством измерения с отклонением от НСХ не более ± 4 градуса в диапазоне температур от 600 до 1600°C.

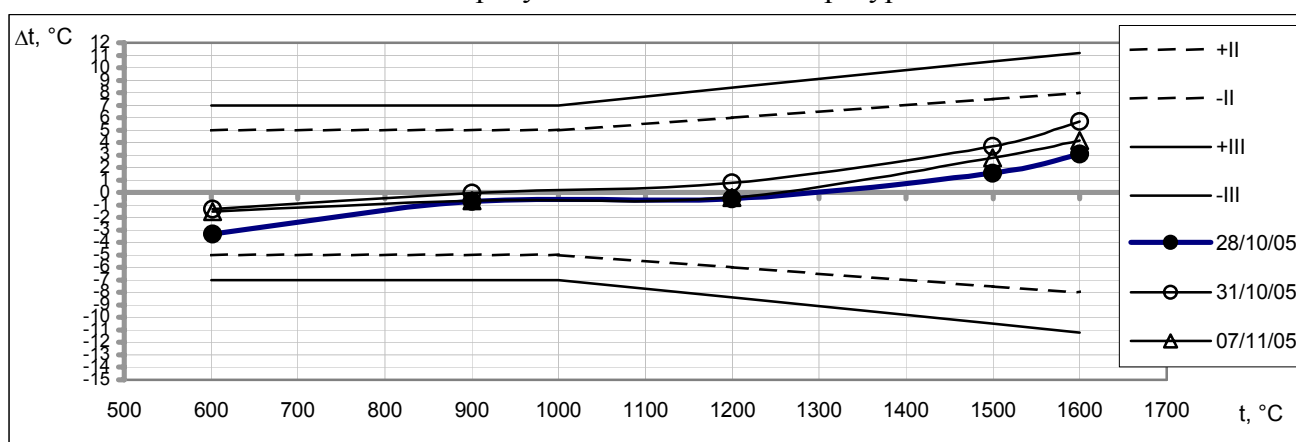


Рис. 9 Изменение калибровочной характеристики термопары ВР 5/20 относительно НСХ. (заводская комплектация 1990 г.в., термоэлектроды $\varnothing 0,5$ мм, гр.А-1)

Суммируя все вышеизложенное, можно сделать заключение, что вольфрамрениевая термопара и термопреобразователи на ее основе имеют технический потенциал, который в настоящее время используется далеко не полностью. Как показывает первый опыт, надежные конструкции вольфрамрениевых термопреобразователей возможны, условия для их серийного производства и метрологического обеспечения имеются. В настоящее время идут производственные испытания опытных партий продукции, к которым могут присоединиться все потребители, заинтересованные в применении данных средств измерений. Решение задачи достижения длительного рабочего ресурса серьезно расширит область применения вольфрамрениевых термопреобразователей, в т.ч. позволит произвести частичное замещение термопреобразователей с термопарами из драгоценных металлов в диапазоне температур 1000÷1700°C.

Список использованной литературы:

1. Межгосударственный стандарт ГОСТ 6616-94. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. Минск, изд-во стандартов, 1998.
2. И.Л.Рогельберг, В.М.Бейлин. Сплавы для термопар. Справочник, М., Металлургия, 1983.
3. Государственный стандарт РФ ГОСТР 8.585-2001. ГСОЕИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. Москва, изд-во стандартов, 2002.
4. СУО.021.142 ТУ. Проволока из сплава вольфрама с рением отожженная градуированная для термоэлектродов термопар. Технические условия.
5. Л.Д.Олейникова Исследование новых типов термопар для измерения высоких температур. Диссертация на соискание ученой степ. к.т.н., ВНИИМ, Ленинград, 1969.
6. . И.П.Куритнык, Г.С.Бурханов, Б.И.Стаднык Материалы высокотемпературной термометрии. М.,Металлургия, 1986.
7. G.W.Burns, W.S.Hurst . Studies of performance of W-Re type thermocouples. National Bureau of Standards, USA. In Proceedings : "Properties and performance of thermocouple materials", pp.1751-1766, 1972.
8. О.А.Герашенко, А.Н.Гордов, А.К.Еремина, В.И.Лах, Я.Т.Луцик и др. Температурные измерения. Справочник, Киев, Наукова Думка, 1989.
9. Б.И.Стаднык, С.П.Яцишин Пути стабилизации эксплуатационных характеристик высокотемпературных термоэлектрических термометров. М., ЦНИИТЭИприборостроения, 1977, с.41. .
10. Б.И.Стаднык, С.П.Яцишин, Солянык Л.М. О причинах изменения термоЭДС вольфрамрениевых сплавов. ж.ТВТ, 1976 (14), №3, с.533-537.
11. R.E.Bedford, G.Bonnier, H.Maas, F.Pavese Techniques for approximating the international temperature scale of 1990. Paris, VIPM reprint, 1997.
12. А.А.Фрактовникова, Б.В.Кебадзе, В.П.Корнилов Опыт разработки и применения высокотемпературных термопар в ГНЦ РФ ФЭИ. Тез.докл. 2-ой Всероссийской конференции по проблемам термометрии «Температура-2004», изд.ФГУП НИИ НПО «ЛУЧ», г.Подольск, март 2004 г.
13. А.А.Улановский, А.А.Плохих, П.Н.Мартынов Термоэлектрический преобразователь. Патент на полезную модель №42311 от 27.11.2004 г.
14. Улановский А.А., Фрольцов М.С., Шкарупа И.Л. Термозонд для металлургических печей. Патент на полезную модель №51422 от 10.02.2006 г.
15. МИ 1745-87 Методические указания. ГСИ. Стандартные образцы свойств термоэлектродных материалов из сплавов ВР 5 и ВР 20 (СОТМ ВР 5/20). Методика аттестации.
16. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.338-2002. Преобразователи термоэлектрические. Методика поверки. Минск, изд-во стандартов, 2003 г.