

УДК 536.532: 621.3.036.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ВЕРХНЕМ ПРЕДЕЛЕ РАБОЧЕГО ДИАПАЗОНА ТЕМПЕРАТУР

© Улановский Анатолий Александрович

ООО «Обнинская термоэлектрическая компания». Россия, Обнинск

Калимулина Светлана Игоревна, канд. техн. наук; Беленький Анатолий Матвеевич, д-р техн. наук, проф.; Бурсин Александр Николаевич; Дергаусова Лидия Николаевна

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». Россия, Москва. E-mail: energomet@misis.ru

Статья поступила 26.08.2010 г.

При контроле изменения температуры в рабочем пространстве печи и заготовке с помощью кабельных термопар важна стабильность термоЭДС термопары в течение всего технологического процесса. Дрейф термоЭДС на верхнем пределе рабочего диапазона неизбежен при температурах 1200-1300 °С. Выполнено исследование стабильности градуировочной характеристики жаростойких кабельных термопар типов *K* и *N* diam. 1,5 и 3,0 мм при отжиге на воздухе при температуре 1200 °С. Обнаружен значительный дрейф термоЭДС, который превышает пределы допускаемых отклонений по ГОСТ Р 8.585-2001 для указанных типов термопар. Зафиксирован также заметный эффект шунтирования сигнала кабельной термопары при нагреве выше 1000 °С промежуточного участка кабеля.

Ключевые слова: температура; печь; кабельная термопара; термоЭДС; стабильность; дрейф.

Правильность организации технологических процессов предполагает в первую очередь, точность соблюдения временно-температурных параметров тепловых агрегатов, которые контролируются датчиками температуры различных типов. При их разработке, установке и определении реальной точности измерений необходимо учитывать взаимодействие средства измерения с объектом контроля и агрегатом.

Вопросы энергосбережения в процессах нагрева слябов и термообработки металлопроката приобретают все большее значение. Для определения оптимального режима нагрева и термообработки необходимо знание температурного профиля по объему печи, а также кривые нагрева изделий в печи. Для этих целей служат автономные системы мониторинга температурного профиля печи, разрабатываемые НПУЦ «ЭНЕРГОМЕТ» (НИТУ «МИСиС») и некоторыми иностранными фирмами, в том числе фирмой DATAQ (Великобритания). Первичными датчиками температуры в этих системах служат кабельные термоэлектрические термометры (ТП) типов *K* (хромель-алюмель — ХА) или *N* (нихросил-нисил — НН). При этом очень часто эти ТП одновременно работают на верхнем пределе рабочего диапазона температур (1200-1300 °С) — например, при нагреве слябов и термообработке массивных изделий. В этих условиях важна стабильность термоЭДС (ТЭДС) термопары в течение процесса нагрева (5-8 ч). ТП обычно имеют высший класс точности, особо жаростойкую оболочку, но тем не менее дрейф ТЭДС возможен и зачастую неизбежен при такой высокой температуре. Для сохранения точности измерений иностранный производитель системы мониторинга печи рекомендует использовать новые ТП для каждого эксперимента по обследованию печи. Учитывая, что стоимость длинной (до 10 м) кабельной термопары в жаростойкой оболочке может достигать 250-300 евро, комплект из 10 термопар может стоить более 150 тыс. руб. Поэтому на отечественных предприятиях желательно использовать комплект термопар несколько раз, однако такая возможность должна быть экспериментально обоснована.

Для определения предельной длительности применения термопар в рабочих условиях было проведено

исследование стабильности кабельных ТП типов *K* и *N* на разных уровнях температур. Исследование заключалось в определении времени, в течение которого значение ТЭДС исследуемого ТП при заданной температуре выйдет за пределы допускаемых отклонений от номинального значения для первого класса по ГОСТ 6616-94 ($\pm 0,004t$, где t - измеряемая температура, °С).

На этот процесс могут влиять следующие факторы: уровень рабочей температуры; диаметр кабеля и термоэлектродов ТП; материал защитной оболочки термопарного кабеля и электроизоляции электродов; тип термоэлектродов.

Проверяли стабильность кабельных ТП на уровне 1200 °С — верхнем пределе температуры длительного применения для термопар типов *K* и *N* с контролем градуировочной характеристики ТП в точках 600, 900, 1000, 1100 и 1200 °С. Были изготовлены пять комплектов (сборок) гибких кабельных термоэлектрических преобразователей (по три образца в каждом комплекте), которые отличались типом термопар, материалом оболочки (Инконель 600 или Никробель), диаметром оболочки (1,5 или 3 мм) и диаметром термоэлектродов (~0,2 или 0,6 мм). Термопарный кабель — английского производства. До начала экспериментов ТП прошли процедуру калибровки. Исходные данные по ТП представлены в таблице.

Эксперименты проводили в Межкафедральной в учебно-научной лаборатории «Теплотехнические измерения в металлургии» НИТУ «МИСиС», которая имеет право калибровки средств измерений температуры в соответствии с аттестатом аккредитации на право проведения калибровочных работ (реестр № 002013), полученным в декабре 2007 г. сроком на

Исходные данные кабельных термопреобразователей

| Т и п Т П | Диаметр чехла, мм | Материал оболочки термопарного кабеля | Заводской номер ТП | Отклонения ТЭДС от номинального значения | | | | Время отжига, ч |
|-----------------------|-------------------------|--|--------------------------|--|-------|---|------|-----------------------|
| | | | | По сертификату производителя при температуре, °С | | Исходная калибровка после отжига на 1000 °С | | |
| | | | | 100 0 | 700 | 100 0 | 700 | |
| К | 3,0 | Никробель | 1 | -1,3 0 | -0,40 | 0,3 | 0,3 | 4 |
| | | | 2 | | | 0,4 | 0,3 | |
| | | | 3 | | | -0,3 | 0 | |
| к | | Инконель 600 | 4 | -2,0 0 | -1,50 | 0,5 | -0,4 | 4 |
| | | | 5 | | | 0,5 | -0,4 | |
| | | | 6 | | | 0,9 | -0,2 | |
| N | | | 7 | -1,6 6 | -0,33 | 1,1 | -0,2 | 4 |
| | | | 8 | | | 0,8 | -0,3 | |
| | | | 9 | | | 1,1 | -0,3 | |
| К | 1,5 | Инконель 600 | 10 | 0,82 | 1,29 | 0,8 | 0,8 | 8 |
| | | | И | | | 0,8 | 0,7 | |
| | | | 12 | | | 0,8 | 0,6 | |
| N | | | 13 | -2,5 2 | -1,27 | -3,5 | -2,9 | 8 |
| | | | 14 | | | -3,4 | -2,7 | |
| | | | 15 | | | -3,9 | -2,2 | |

пять лет. Комплекты кабельных ТП поочередно отжигали в течение 6-9 ч при 1200 °С, а затем осуществлялась промежуточная калибровка ТП. Отжиг осуществляли в трубчатой электропечи сопротивления модели СУОЛ-0,25.1/12-И1. Калибровка ТП выполнена на стенде «Проверка и градуировка высокотемпературных термоэлектрических термометров», который включает в себя: печь СОД-1750.1Ф с блоком управления (интервал рабочих температур 600-1700 °С); поверяемый комплект термопар; эталонный термоэлектрический термометр типа ППО-1250; коробку «холодных» спаев ТП; многоканальный прецизионный измеритель-регулятор температуры (ИРТ) МИТ 8.03 ver. 2; персональный компьютер (ПК) с установленным программным обеспечением. Все оборудование и эталонные средства измерения, применяемые во время работы, имели свидетельства о поверке органов государственной метрологической службы.

Калибровку кабельного ТП производили в соответствии с методикой поверки ТП (ГОСТ 8.338-2002) методом сравнения показаний калибруемых ТП с действительной температурой в печи, определяемой по эталонной термопаре, которую вместе с калибруемой сборкой ТП погружали в высокотемпературную электропечь для градуировки термопар СО,1-1750.1Ф. Электропечь предназначена для градуировки термопар в воздушной среде до максимальной температуры 1700 °С и имеет вертикальный трубчатый хромитлантановый нагревательный элемент внутренним диам. 32 мм, теплоизолированный от окружающего пространства. Внутри рабочей части нагревателя имеется глухая перегородка (из того же материала, что и сам нагреватель), что значительно уменьшает конвективный поток воздуха в рабочем пространстве печи. Сверху внутрь кольцевого нагревателя устанавливается корундовая трубка с запаянным концом, в которую помещаются пучок калибруемых термопар, эталонная термопара в кварцевом

чехле и управляющая термопара печи. Температуру свободных концов ТП в коробке измеряли платиновым термометром сопротивления класса А, подключенным к одному из измерительных каналов, ее значение учитывали при пересчете показаний ТЭДС термопар.

Калибровку термопар в градуировочной печи проводили по заданной программе нагрева и выдержки на разных уровнях температур. После стабилизации температурного режима на заданном уровне температуры производили замер показаний ТЭДС термопар и определяли действительную температуру печи по эталонной термопаре. Калибровку ТП проводили при температурах 1200, 1100, 1000, 900, 600 °С. Процедуру калибровки производили при температуре окружающего воздуха (20±5) °С, относительной влажности воздуха 50%, атмосферном давлении 100 кПа, напряжении питающей сети (220±4,4) В. Показания ТП измерялись МИТ и передавались на ПК, где определялось отклонение измеренных ТЭДС термопар от номинальных значений. Результаты калибровки оформляли в виде протоколов.

После завершения калибровки и естественного остывания до комнатной температуры сборка ТП проходила процесс отжига в электрической трубчатой печи при 1200 °С в течение 6-9 ч. При этом глубина погружения термопар в печь при калибровке и отжиге была одинаковой. Описанная последовательность повторялась для каждой сборки кабельных ТП. Параметры фактического термоциклирования термопар соответствуют реальному режиму при обследованиях промышленных печей.

Из графика (рис. 1) отклонения ТЭДС от номинальных значений в зависимости от времени отжига кабельного ТП (зав. № 1, тип К, диам. 3 мм, оболочка Никробель) в трубчатой электрической печи видно, что ТЭДС кабельного термопреобразователя типа ХА выходит за пределы допускаемых отклонений перво-

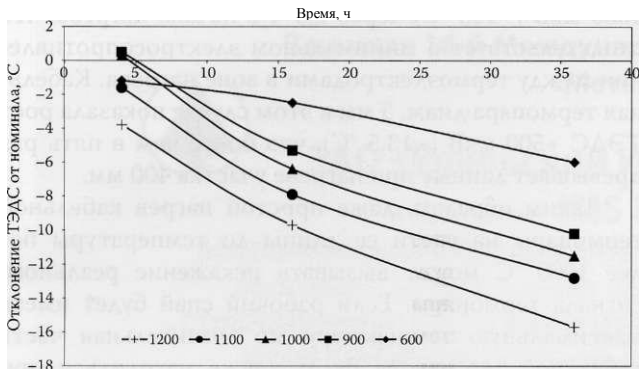


Рис. 1. Отклонения ТЭДС от номинальных значений для ТП (зав. № 1) в зависимости от длительности отжига при 1200 °C

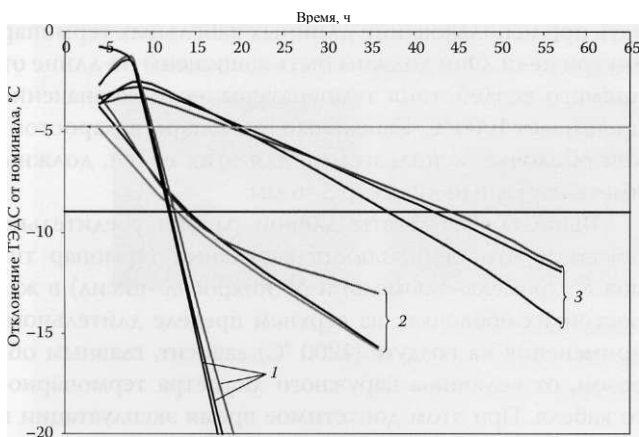


Рис. 2. Отклонения ТЭДС кабельных ТП типа ХА от номинального значения при 1200 °C в зависимости от длительности отжига: 1 — диам. 1,5 мм (Инконель 600); 2 — диам. 3 мм (Никробель); 3 — диам. 3 мм (Инконель 600)

го класса при температуре 1200 °C примерно через 5 ч отжига, а за пределы второго класса — через 14 ч. При этом чем ниже температура калибровки, тем меньше отклонение ТЭДС от номинального значения: при 900 °C они вдвое меньше, чем при 1200 °C.

При отжиге при температуре 1200 °C в течение 10 ч кабельный ТП типа ХА диам. 1,5 мм (оболочка Инконель 600) выходит за пределы допускаемых отклонений первого класса, в течение 12 ч — за пределы второго класса. Однако за это время он выходит за пределы допускаемых отклонений почти во всех точках калибровки вплоть до 600 °C. Это свидетельствует о том, что высокотемпературный отжиг кабеля меньшего диаметра приводит к быстрой его деградации во всем диапазоне рабочих температур.

Сравнивая отклонения кабельных ТП типа ХА в оболочке Инконель 600 диаметрами 1,5 и 3 мм, можно отметить, что в течение первых 10 ч отжига показания ТП имеют примерно равную стабильность. Затем ТЭДС ТП диам. 1,5 мм начинает резко снижаться и к 55 ч отжига достигает значений -71 °C при 1200 °C и -35 °C при 600 °C.

Сравнительные графики отклонений ТЭДС от номинальных значений при температуре отжига 1200 °C для кабельных термопреобразователей типа ХА представлены на рис. 2. Проанализировав полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1. Кабельные термопреобразователи типов К и N наружным диам. 1,5 мм (оболочка Инконель 600) при

отжиге на температуре 1200 °C выходят за пределы допускаемых отклонений первого класса по ГОСТ 6616-94 в среднем за 10 ч, а уже через 15-16 ч не соответствуют требованиям ГОСТ Р 8.585-2001 по своей индивидуальной статической характеристике. Этот факт не допускает повторного использования кабельных ТП диам. 1,5 мм на верхних пределах рабочего диапазона температур.

2. Кабельные термопреобразователи типов К и N наружным диам. 3 мм в оболочке Инконель 600 при отжиге при температуре 1200 °C выходят за пределы допускаемых отклонений первого класса по ГОСТ 6616-94 в среднем через 20-21 ч; через 40-45 ч они не соответствуют требованиям ГОСТ Р 8.585-2001 по индивидуальной статической характеристике. При этом стабильность ТП разных типов примерно одинакова. Факт быстрого отрицательного дрейфа ТЭДС ТП типа ХА в особо жаростойкой оболочке Никробель объясняется большим исходным отрицательным отклонением ТЭДС от номинального значения. Градиент наклона кривых для всех кабельных ТП диам. 3 мм примерно одинаков. Повторное использование таких термопар также проблематично, так как устойчивый отрицательный дрейф ТЭДС уже через 10-15 ч составляет -5 °C за 20 ч, что будет приводить к неоднозначности результатов.

3. При использовании кабельных термопреобразователей на верхних пределах рабочего диапазона температур основное влияние на скорость дрейфа ТЭДС термопары оказывает наружный диаметр кабеля (термоэлектродов). Влияние типа термопары, материала жаростойкой оболочки второстепенно.

Вышеприведенные выводы были бы неполными, если не учитывать другой важный фактор, непосредственно влияющий на показания кабельных термопар, — шунтирование сигнала ТЭДС по длине термопарного кабеля, подвергающегося воздействию высокой температуры. При этом чем меньше диаметр кабеля, тем заметнее должен быть этот эффект, так как термоэлектроды термопары в кабеле наружным диам. 1,5 мм находятся на расстоянии 0,2-0,3 мм друг от друга и от оболочки кабеля. Они изолированы оксидом магния, электросопротивление которого заметно уменьшается с повышением температуры.

Для проверки этого эффекта был проведен следующий эксперимент: длинные (до 10 м) кабельные термопары типа ХА наружным диаметром 1,5 и 3 мм в оболочке Инконель 600 пропускали через одну или две трубчатые печи так, чтобы рабочий спай термопары и ° ее свободные концы находились бы в одном месте при одинаковой температуре окружающей среды. Согласно законам термоэлектрических цепей, результирующая ТЭДС такой термопары должна быть равна нулю независимо от величины градиента температуры по длине термопары. Однако, как показал опыт, это пра-

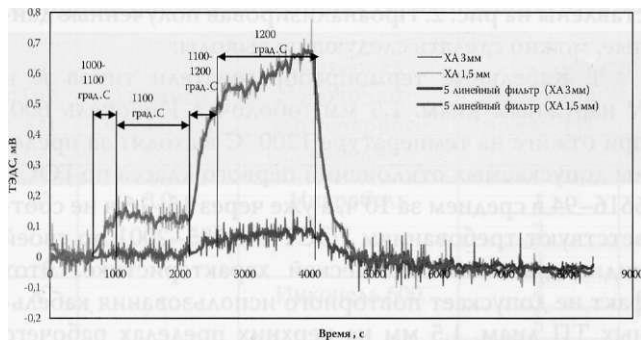


Рис. 3. Кривые термоТЭДС кабельных термопар наружным диам. 1,5 и 3,0 мм при прогреве участка кабеля длиной 400 мм

вило соблюдается только в случае, если температура оболочки кабеля не превышает 1000 °С.

Длина нагреваемого участка кабельной термопары в печи составляла около 400 или 800 мм при использовании одной или двух печей соответственно. Нагрев участка кабеля в печи велся ступенчато. Показания термопар фиксировали на приборе МИТ-8.03 и графически воспроизводили на экране компьютера (рис. 3).

Пока нагреваемый участок кабеля имеет температуру ниже 1000 °С, результирующая ТЭДС термопары колеблется относительно нулевого значения, имея случайные отклонения. Когда температура достигает 1000 °С, ТЭДС термопары наружным диам. 1,5 мм начинает расти и достигает +130 мкВ (~3,4 °С) при 1100 °С и +670 мкВ (-18 °С) при 1200 °С. ТЭДС кабельных термопар диам. 3 мм начинает возрастать при 1100 °С, и заметный рост происходит при нагреве до 1200 °С (+90 мкВ или -2,3 °С). При понижении температуры печи ТЭДС возвращалась к нулевым значениям.

При повторном нагреве термопарных кабелей на другом участке, но уже в двух печах (длина участка нагрева 800 мм) кабельная термопара диам. 1,5 мм показала заметную отрицательную ТЭДС уже при 1000 °С (-700 + -800 мкВ), при 1100 °С возникали отклонения ТЭДС как положительного, так и отрицательного знаков, что может быть объяснено наличием двух участков нагрева и более холодной зоны между ними. При 1200 °С начинает резко возрастать ТЭДС с постоянным положительным

градиентом, который достигает 5000 мкВ (-135 °С) через 2,5 ч с начала нагрева, что свидетельствует о минимальном электросопротивлении между термоэлектродами в зоне нагрева. Кабельная термопара диам. 3 мм в этом случае показала рост ТЭДС +500 мкВ (-13,5 °С), что более чем в пять раз превышает данные при нагреве участка 400 мм.

Таким образом, даже простой нагрев кабельной термопары на части ее длины до температуры более 1000 °С может вызывать искажение реального сигнала термопары. Если рабочий спай будет иметь максимальную температуру, но значительная часть кабельной термопары будет также находиться при температуре выше 1000 °С, то результирующая ТЭДС будет снижаться вследствие шунтирования сигнала по длине термопары. Эти факторы следует всегда учитывать при использовании длинных кабельных термопар внутри печи. Они должны быть защищены по длине от прямого воздействия температуры, если ее значение превышает 1000 °С. Кабельные термопары в жаростойкой оболочке, используемые для этих целей, должны иметь наружный диаметр 5-6 мм.

Выводы. Результаты данной работы убедительно показали, что стабильность кабельных термопар типов *K* (хромель-алюмель) и *N* (нихросил-нисил) в жаростойких оболочках на верхнем пределе длительного применения на воздухе (1200 °С) зависит, главным образом, от величины наружного диаметра термопарного кабеля. При этом допустимое время эксплуатации в режиме термоциклирования для кабельных термопар диам. 1,5 мм ограничено 15-16 ч, а для термопар диам. 3 мм — периодом 40-45 ч. Дальнейшая их эксплуатация невозможна из-за дрейфа ТЭДС за пределы допустимых отклонений по ГОСТ Р 8.585-2001. Многократная эксплуатация термопар диам. 1,5 мм невозможна, а термопар диам. 3 мм проблематична из-за заметного дрейфа ТЭДС между двумя последовательными измерениями. При этом необходимо также учитывать возможность шунтирования сигнала кабельной термопары по длине при высоких температурах, что также повышает неоднозначность получаемых результатов. Кабельные термопары больших диаметров более стабильны, но их цена в жаростойком исполнении в несколько раз больше, выше и их тепловая инерционность.