

СТАБИЛЬНОСТЬ КАБЕЛЬНОЙ ТЕРМОПАРЫ НИХРОСИЛ-НИСИЛ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ

А.В.Белевцев, А.В.Каржавин, А.А.Улановский

Производственная компания «ТЕСЕЙ», г.Обнинск, Калужской области, Россия

Аннотация: приведены экспериментальные данные по стабильности кабельных термопар нихросил-нисил (тип N) при ступенчатом термоциклировании в диапазоне температур 20...1100 °С, а также при непрерывной выдержке на воздухе при температуре 1085±10 °С. Проведен анализ влияния термоциклирования на величину дрейфа термо-ЭДС термопары типа N, сделан вывод о возможности ее использования в качестве эталонной термопары при градуировке промышленных термопар из неблагородных металлов.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая стабильность термопары нихросил-нисил (тип N) по сравнению с металлическими термопарами других типов хорошо известна. В работе (1) показано, что в окислительной среде термоэлектрическая стабильность проволочной термопары типа N примерно такая же, как и у термопар из драгоценных металлов типов R и S до температуры 1200 °С. В работе (2) приведены экспериментальные данные по дрейфу термо-э.д.с. термопар типа N при выдержке на температуре 1000 °С в течение 2000 ч. Данные свидетельствуют о лучшей стабильности кабельной термопары типа N в жаростойком чехле из сплава Инконель наружным диаметром 3 мм по сравнению с проволочной термопарой типа N с диаметром термоэлектродов 1,6 мм. Эти материалы делают привлекательной попытку использовать кабельную термопару нихросил-нисил в качестве эталонного средства измерения температуры при калибровке рабочих металлических термопар других типов в диапазоне температур 300-1100 °С.

Однако любое эталонное средство работает не столько в режиме длительной выдержки при высоких температурах, сколько в режиме термоциклирования в пределах рабочего диапазона калибровки. При термоциклировании могут проявить себя и другие факторы, влияющие на стабильность термопары, например, термические напряжения и усталость металла термоэлектродов. Авторы предприняли попытку исследовать стабильность кабельной термопары нихросил-нисил в жаростойкой оболочке в условиях ежедневно повторяющегося термоциклирования термопары в рабочих диапазонах калибровки.

1. ИССЛЕДОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения исследований были отобраны образцы термопарного кабеля с минеральной изоляцией производства фирмы ABB Automation Products GmbH. Наружный диаметр кабеля 3 мм, термопара нихросил-нисил (тип N), оболочка из сплава Инконель 600.

Исследования проводились в трубчатой печи специальной конструкции, предназначенной для калибровки термопар. Внутренний диаметр рабочего пространства печи 50 мм. Общий вид печи представлен на рис.1. Для обеспечения минимального градиента температур в рабочей зоне печи, в нее устанавливался никелевый блок с центральным глухим отверстием диаметром 26 мм. В это отверстие устанавливалась корундовая пробирка наружным диаметром 25 мм и внутренним 18 мм, а в пробирку устанавливалась сборка термопар, состоящая из эталонной платиновой термопары в кварцевой пробирке (диаметры 10/7 мм) и четырех кабельных термопар, обвязанных вокруг пробирки никелевой проволокой. Горячие спаи термопар находились в одном поперечном сечении (рис.2). Максимальная погрешность эталонной платиновой термопары составляла 0,6 °С в точке затвердевания меди (1084,62 °С), общая погрешность измерений не превышала 0,9 °С.

Были проведены две серии испытаний. В первой серии испытания проводились следующим образом. Четыре кабельные термопары типа N, изготовленные из одной бухты кабеля (№3659), вместе с эталонной термопарой типа S вставлялись в никелевый блок и затем в печь. Глубина погружения сборки составляла 300 мм по торцу никелевого блока. После этого проводилась первичная калибровка термопар нихросил-нисил

вблизи точек затвердевания меди, алюминия и цинка согласно температурной шкале МТШ-90.

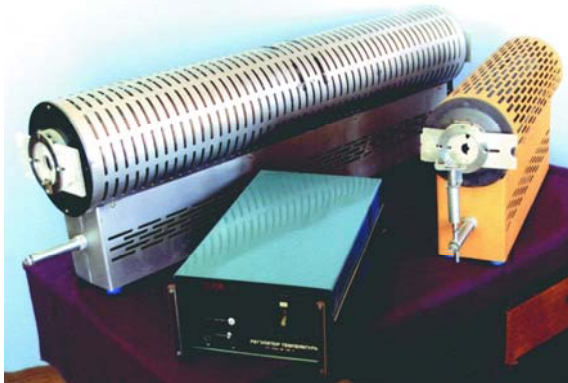


Рис. 1. Малоинерционная трубчатая печь

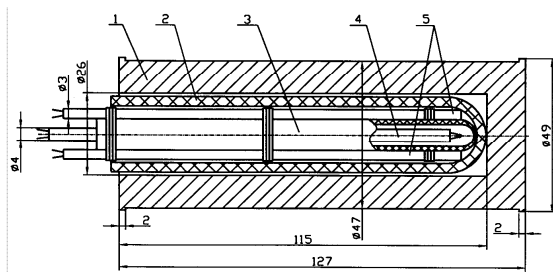


Рис. 2. Сборка термомпар, вставляемая в градуировочную печь

1. – никелевый блок;
2. – корундовая пробирка $\varnothing 25 \times 18$ мм;
3. – кварцевая пробирка $\varnothing 10 \times 7$ мм;
4. – эталонная платиновая термопара ТППО (тип S) в корундовой двухканальной соломке $\varnothing 4$ мм;
5. – кабельные термопары $\varnothing 3$ мм.

Калибровка термопар нихросил-нисил производилось в следующем порядке:

- нагрев термопарной сборки до температуры $1085 \pm 10^\circ\text{C}$ и выдержка на этой температуре около 30 минут;
- измерение термо-ЭДС всех термопар;
- определение температуры в печи по эталонной термопаре;
- пересчет величин термо-ЭДС термопар типа N для температуры затвердевания меди;
- определение отклонений каждой термопары типа N от номинального значения для температуры затвердевания меди;
- снижение температуры и выдержка вблизи точек затвердевания алюминия, затем цинка и определение отклонений термо-ЭДС термопар типа N в каждой точке;
- охлаждение термопарной сборки вместе с печью.

Далее эталонная платиновая термопара извлекалась из печи, а термопары нихросил-нисил подвергались ступенчатому термоциклированию в диапазоне температур $20 \dots 1100^\circ\text{C}$. Термопары нагревались в печи до температуры $1085 \pm 15^\circ\text{C}$, выдерживались 30 минут при этой температуре, охлаждались вместе с печью до температуры $660 \pm 15^\circ\text{C}$, выдерживались 30 минут на данной температуре, охлаждались и выдерживались на температуре $420 \pm 15^\circ\text{C}$, и затем охлаждались вместе с печью. Интенсивность термоциклирования – один цикл в день, при этом в течение 5 часов термопары находились при температуре выше 420°C . Через каждые 10 циклов производилась калибровка термопар нихросил-нисил по эталонной платиновой термопаре, вставлявшейся в печь на время калибровки. Общее количество циклов 120.

Для сравнения результатов была проведена вторая серия опытов по длительной выдержке термопар при постоянной температуре ($1085 \pm 10^\circ\text{C}$). Термопарная сборка состояла из 4 кабельных термопар типа N диаметром 3 мм, изготовленных из двух бухт кабеля (№3659 и 3658) по две термопары (причем две термопары изготовлены из той же бухты кабеля, что и в первой серии). Эталонной термопарой служила платиновая термопара типа S, которая находилась непрерывно в печи вместе с кабельными термопарами. Длительность опыта составила 270 часов. Печь и термопарная сборка были той же конструкции, что и в первой серии опытов. Измерение термо-ЭДС кабельных термопар и определение отклонений от номинальных значений производилось каждые 8-10 часов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.3 представлены результаты первой серии опытов, а именно, величина термо-ЭДС термопар типа N в зависимости от количества проведенных термоциклов. Горизонтальная линия – номинальная величина термо-ЭДС при указанной температуре, пунктирные линии – допускаемые отклонения термо-ЭДС для 1-ого (нижняя) и 2-ого (верхняя) классов допуска по стандарту МЭК-584. Видно, что до 40 термоциклов термопары очень стабильны, затем следует плавный переход, и термо-ЭДС после 70 циклов вновь стабилизируется.

По договору между компанией «ТЕСЕЙ» и Сибирским институтом метрологии (г. Новосибирск) сотрудники института повторили программу экспериментов на трех кабельных термопарах типа N диаметром 3 мм, которые были изготовлены нами из бухты кабеля, имевшейся в

наличии (№3658). Ступенчатое термоциклирование кабельных термопар производилось в печи вышеописанным образом, но калибровка проводилась в печах, воспроизводящих стандартные точки затвердевания меди, алюминия и цинка температурной шкалы МТШ-90. Эти установки имеют очень высокую точность. Погрешность воспроизведения температуры в точке затвердевания меди не превышает 0,01 К. Глубина погружения термопар в печи при калибровке и термоциклировании составляла 500 мм. Результаты также представлены на рис.3. Стабильность термопар в пределах 40 термоциклов оказалось такой же, как и в наших опытах.

Увеличение дрейфа термопар типа N между 40-ым и 70-ым циклами в нашей серии опытов может быть вызвано развитием локальной неоднородности в термоэлектродах нихросил-нисил. Из рис.3 видно, что увеличение дрейфа термо-ЭДС термопар типа N происходит не только в точке затвердевания меди, но и в точках алюминия и цинка, причем величины дрейфа при меньших температурах превышают дрейф в точке затвердевания меди. Для исключения возможных методических погрешностей в наших экспериментах требовалась повторная высокоточная калибровка термопар. По окончании опытов мы переслали две кабельные термопары типа N и эталонную термопару типа S в Сибирский институт метрологии (СИМ), где была проведена их калибровка в печах, воспроизводящих стандартные точки затвердевания меди, алюминия и цинка. Изменение термо-ЭДС эталонной термопары при температуре затвердевания меди не превысил 2 мкВ от величины термо-ЭДС, указанной в свидетельстве на термопару. Это говорит о достоверности определения опорной температуры в наших опытах. Величины термо-ЭДС кабельных термопар типа N были зафиксированы на уровне исходных значений до начала термоциклирования. Различие в величинах термо-ЭДС до термоциклирования (измеренные в нашей печи) и после термоциклирования (измеренные в печи СИМ) не превысило 5-7 мкВ в точке затвердевания меди. Мы объясняем этот факт тем, что локальная неоднородность термоэлектродов, образовавшаяся в наших экспериментах, при большем погружении в печь СИМ (с 300 до 500 мм) оказалась в зоне равномерной температуры, и расхождение показаний практически исчезло. Эти факты косвенно подтверждают отсутствие принципиальных методических ошибок в наших экспериментах, а также вывод о возможности образования

локальной неоднородности в термоэлектродах термопары типа N при термоциклировании.

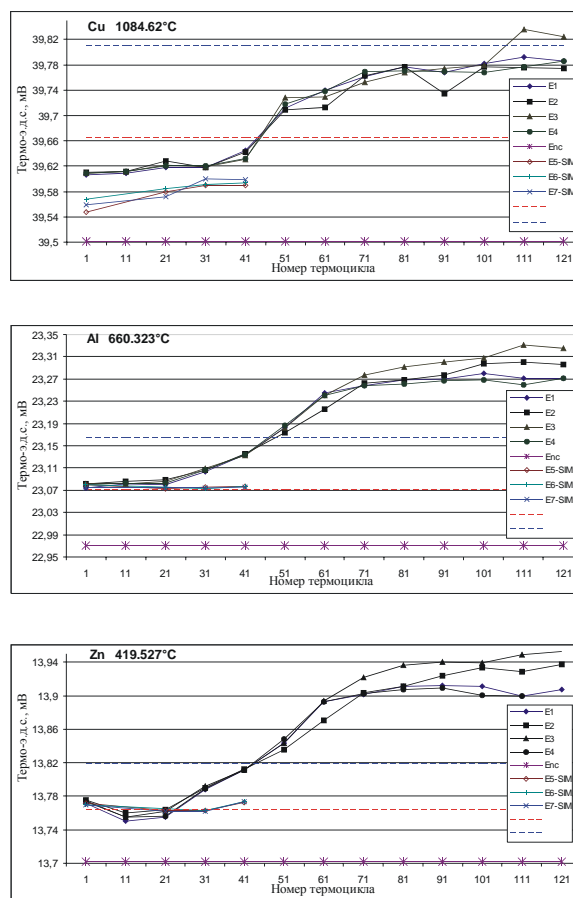


Рис.3. Дрейф термо-ЭДС в точках затвердевания меди, алюминия, цинка для кабельных термопар типа N наружным диаметром 3 мм при термоциклировании на воздухе.

Результаты второй серии опытов с кабельными термопарами типа N представлены на рис.4 после 270 часового непрерывного отжига на воздухе при температуре $1085 \pm 10^\circ\text{C}$.

Данные свидетельствуют о высокой стабильности кабельных термопар типа N при непрерывном отжиге на высоких температурах и совпадают с результатами опытов американских исследователей (2). Дрейф термо-ЭДС происходит только в течение первых 50 часов на величину 10-13 мкВ.

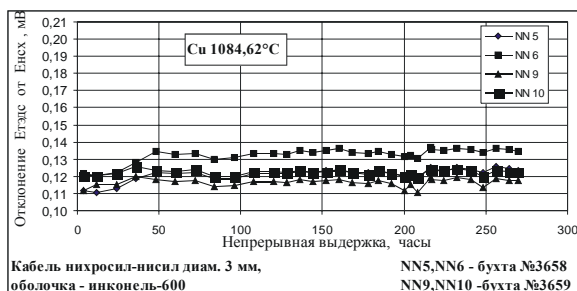


Рис.4. Дрейф термо-ЭДС кабельных термопар типа N наружным диаметром 3 мм при непрерывной выдержке на воздухе при температуре $1085\pm 10^\circ\text{C}$. Ось абсцисс – номинальная величина термо-ЭДС термопары типа N в точке затвердевания меди (39,502 мкВ).

ВЫВОДЫ

Таким образом, первые результаты исследований подтверждают факт влияния термоциклирования на стабильность градуировочной кривой термопары нихросил-нисил. Кроме того, подтверждаются данные других работ о высокой стабильности термопары нихросил-нисил по сравнению с другими термопарами из благородных металлов. Стабильность термопары типа N сравнима со стабильностью термопары типа S, и, следовательно, первая также может быть использована в качестве эталонной термопары для калибровки термопар из благородных металлов.

При этом важное значение приобретает величина дрейфа термо-э.д.с. термопары нихросил-нисил в условиях термоциклирования при проведении калибровочных работ. Как показывают результаты наших исследований термопару типа N можно использовать как эталонное средство измерения температуры при калибровке общепромышленных термопар в печах в течение 40 термоциклов. При этом стоимость ее, как минимум, в 10-15 раз меньше стоимости эталонной платиновой термопары типа S.

Кабельная термопара типа N может использоваться в метрологических лабораториях промышленных предприятий для проведения широкого круга калибровочных работ, но в этом случае межповерочный интервал эталонной термопары следует назначать не в календарных днях, а в числе возможных циклов калибровки, после которого термопара подлежит повторной поверке.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.N.A.Burley, Nicrosil-Nisil type N thermocouples. Measurements&Control, April(1989), pp130-133.
- 2.H.L.Daneman, The choice of sheathing for mineral insulated thermocouples. Measurements&Control, June(1988), pp242-243.