



УДК 621.791

# УТОЧНЕНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕРМОПАР, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ И СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

В. В. Долиненко Е. В. Шаповалов, В. А. Коляда,  
А. В. Гнатушенко, В. В. Якуша

Предложена методика и представлены результаты исследований инерционных свойств термопар, конструкции которых не имеют термогильзы. В экспериментах использовался расплав соли NaCl, который нагревался в индукционной плавильной печи. Для трех типоразмеров хромель-алюмелевых и вольфрам-ренийевых термопар экспериментально получены значения их постоянных времени.

The method was offered and results of investigations of inertia properties of thermocouples, the design of which has no thermosleeves, were presented. In experiments the melt of NaCl salt, which was heated in induction melting furnace, was used. For three typical sizes of chromel-alumel and tungsten-rhenium thermocouples the values of their time constants were obtained.

**Ключевые слова:** термопара; расплав соли; постоянная времени; сигма-дельта АЦП

Термопары являются доступным средством измерения температуры при проведении экспериментов по проверке адекватности тепловых математических моделей сварочных, металлургических и других процессов. Наибольшее распространение в дуговой сварке и спецэлектрометаллургии получили термопары хромель-алюмелевые (ТХА) и вольфрам-ренийевые (ТВР, тип ВР5/ВР20). Они позволяют измерять температуру соответственно до 1300 (ТХА) и 2500 °С (ТВР) с погрешностью  $\pm 1$  °С.

Экспериментальные исследования обычно связаны с циклическим нагревом изделия мощным источником теплоты. Поэтому температура в исследуемой зоне имеет характер несимметричного импульса с крутым передним фронтом нарастания и более пологим срезом спада. Однако ввиду наличия инерционных свойств термопара формирует электрический сигнал термо-ЭДС с отставанием во времени относительно истинного изменения температуры в контролируемой точке изделия. Чем больше постоянная времени термопары, тем больше погрешность измерения температуры. Поэтому при проведении экспериментов важно знать истинное значение постоянной времени применяемой термопары.

Для оценки постоянной времени  $\tau_{tp}$  обычно используют такую формулу [1, 2]:

$$\tau_{tp} = \rho C d / (4\alpha_{эфф}), \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность материала термопары, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  — удельная теплоемкость материала термопары, Дж/кг·К;  $d$  — диаметр термопарной проволоки, м;  $\alpha_{эфф}$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Предварительные исследования показали, что использование формулы (1) для оценки значения постоянной времени термопары вызывает определенные трудности. Коэффициент теплопередачи определяет плотность теплового потока при передаче тепла от одной среды к другой через разделяющую их стенку. Из справочных данных для суммарных коэффициентов теплообмена двух сред жидкость–тонкая стальная стенка–жидкость [3] в качестве ориентировочных значений можно принять  $\alpha_{эфф} = 25 \dots 500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Тогда, например, для хромель-алюмелевой термопары, выполненной из проволоки диаметром  $d = 0,001$  м с плотностью  $\rho = 8700$  кг/м<sup>3</sup> и удельной теплоемкостью  $C = 500$  Дж/кг·К [4], получали  $\tau_{tp} = 2,3 \dots 43,5$  с. Если ориентироваться на верхний предел значений  $\tau_{tp}$ , то на практике это должно вызывать значительное временное запаздывание сигнала ЭДС термопары.

Целью данной работы является уточнение инерционных свойств термопар, применяемых в исследованиях металлургических и сварочных процессов для регистрации термических циклов. Одним из важных характеристик при этом является способность температурного датчика верно отображать максимальное значение температуры в данной точке физического тела, которое фиксировалось при быстрым перемещении или изменении интенсивности

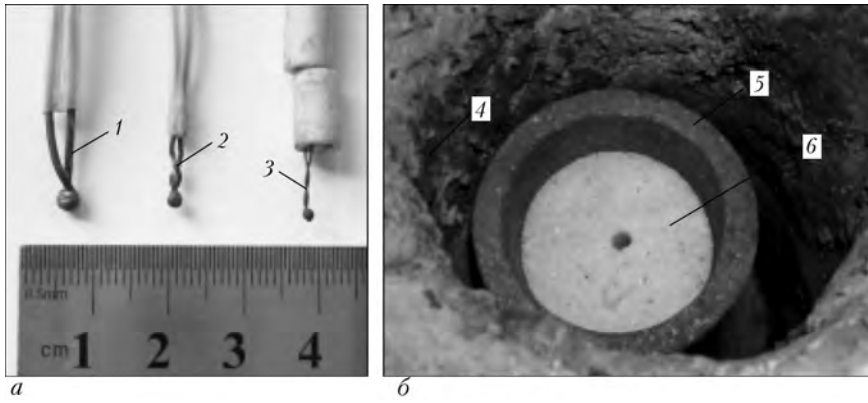


Рис. 1. Условия проведения экспериментов: *a* — исследуемые типоразмеры термопар; 1 — типа ТХА, проволока диаметром 1,0 мм; 2 — типа ТХА, проволока диаметром 0,6 мм; 3 — типа ВР5/ВР20, проволока диаметром 0,2 мм; *б* — индукционная плавильная печь (вид сверху без теплоизоляционной крышки); 4 — футеровка; 5 — тигель; 6 — соль NaCl в холодном состоянии

источника тепла. С целью обеспечения минимального времени отклика сигнала термо-ЭДС использовались конструкции термопар, не имеющие термогильзы или другой защитной арматуры.

Для исследований подготовлены три типоразмера термопар — хромель-алюмелевые с  $d = 1,0$  и  $0,6$  мм и вольфрамрениевые типа ВР5/ВР20 с  $d = 0,2$  мм (рис. 1, *a*). Длина выводов хромель-алюмелевых термопар составляла 1000, вольфрамрениевых — 2000 мм. В качестве объекта измерения температуры выбран расплав поваренной соли NaCl (температура плавления 801, кипения 1465 °C [5]). Соль помещали в графитированный тигель и разогревали до температуры расплава в индукционной плавильной печи с вертикальной загрузкой (рис. 1, *б*).

Каждый эксперимент состоял из следующих фаз: включения электрического питания индуктора плавильной печи и нагрев соли выше температуры плавления (до 850... 1100 °C); отключения электрического питания индуктора; опускания термопары в тигель с расплавом с одновременной регистрацией текущего значения напряжения термо-ЭДС; выемки термопары и охлаждения ее в емкости с холодной водой после достижения предельной температуры. Термопары погружались в расплав соли на глубину около 5 мм.

Температуру измеряли в экспериментах с помощью разработанного микропроцессорного контроллера, структурная схема которого приведена на рис. 2.

В состав контроллера входил 32-разрядный микропроцессор LPC2378 и контроллер интерфейса

Ethernet-100Base-TX, что обеспечило обработку сигналов термо-ЭДС в реальном масштабе времени и выдачу показаний температуры в ПЭВМ. Сигнал термо-ЭДС оцифровывали с помощью дополнительного аналогового узла, построенного на базе микросхемы 24-разрядного сигма-дельта АЦП типа AD7794 (Analog Devices). Оцифрованные данные передавались в микропроцессор через элемент высокочастотной гальванической развязки. Управляющая программа микропроцессорного контроллера пересчитывала напряжение термопары в температуру

по шкале Цельсия в соответствии со стандартными градуировочными таблицами для термопар типа ТХА и ВР5/ВР20 [6] и с учетом температуры холодного спая. Для обеспечения скоростной регистрации частоту настройки цифрового фильтра сигма-дельта АЦП установили 10 Гц. Предварительные испытания разработанного контроллера показали, что его переходная характеристика в режимах измерения температуры как ТХА, так и ВР5/ВР20 термопар имеет вид ступеньки с запаздыванием в пределах 100 мс. Уровень шумов измерений не превышал 2,5 — для режима измерения «ТХА» и 5 °C — для режима измерения «ВР5/ВР20».

Временная диаграмма проведения эксперимента показана на рис. 3.

Из рисунка видно, что к моменту начала эксперимента температура соли достигла 900 °C, а затем в силу действия механизмов теплопроводности, конвекции и лучеиспускания по экспоненциальному закону медленно снижалась с постоянной времени  $\tau_{fur}$ . Значение постоянной времени  $\tau_{fur}$  экспериментально оценено с помощью инфракрасного пирометра с лазерным указателем цели типа ДТ-8869Н, имеющего следующие характеристики: диапазон измеряемых температур -50... 2200 °C; погрешность измерений — не более  $\pm 2\%$ ; время отклика — 150 мс. Измерения динамики остывания соли производились с интервалом 30 с в течение 4 мин (рис. 3, кривая 3). По результатам измерений получена следующая зависимость остывания соли:

$$T_{solt} = T_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fur}}\right),$$

где  $T_{solt}$  и  $T_0$  — соответственно текущее и начальное значения температуры соли, °C;  $t$  — время, с;  $\tau_{fur} = 500$  с.

Измеренная с помощью термопары кривая температуры имела характер импульсного сигнала. Можно выделить четыре фазы соответствующего временного процесса (рис. 3): опускание термопары

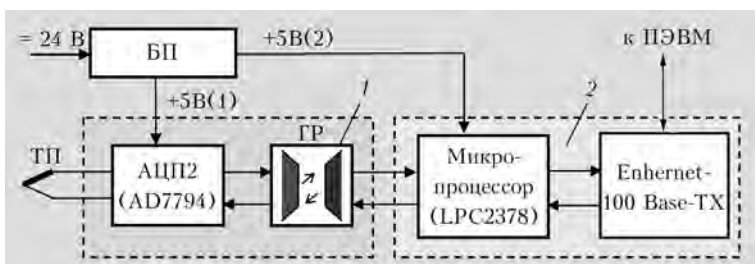


Рис. 2. Структурная схема микропроцессорного контроллера: 1 — аналоговый узел; 2 — цифровой узел; БП — блок питания; ГР — гальваническая развязка; ТП — термопара

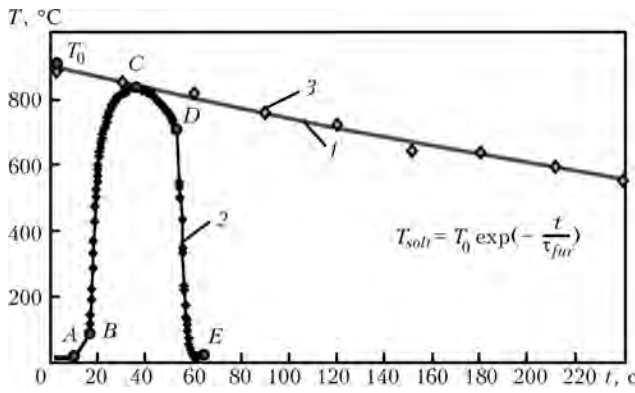


Рис. 3. Временная диаграмма проведения эксперимента: 1 – кривая экспоненты температуры остывания соли; 2 – кривая термоцикла измерения температуры соли с использованием термопары; 3 – экспериментальные данные, полученные с помощью инфракрасного пирометра DT-8869H; A-B – интервал времени, соответствующий опусканию термопары в расплав; B-C – интервал времени измерения температуры расплава; C-D – интервал времени, соответствующий остыванию вынутой из соли термопары на открытом воздухе; D-E – интервал времени, соответствующий остыванию термопары в сосуде с водой

в тигель – A-B; контакт термопары с расплавом и ее резкое нагревание (собственно интервал измерения) – B-C; выемка термопары из тигля – C-D; охлаждение термопары в емкости с холодной водой – D-E. Инерционные свойства термопары оценивались по результатам анализа интервала B-C – на основе разности температур  $\Delta T$ :

$$\Delta T = T_C - T_B,$$

где  $T_B$  и  $T_C$  – температуры, соответствующие точкам B и C, °C;  $t_B$  и  $t_C$  – значения времени, соответствующие точкам B и C, с.

Математическое моделирование показало, что для значений постоянной времени термопары  $\tau_{tp} < 2$  с погрешность определения  $t_{tp}$  в такой схеме эксперимента не превышает 4 %. Поэтому принималось, что температура расплава соли при измерении температуры с помощью термопары имела постоянное значение.

Передаточная функция инерционной термопары соответствует интегрирующему звену первого по-

рядка [1]. Поэтому переходную функцию термопары можно записать следующим образом:

$$T_{tp} = T_{max} [1 - \exp(-\frac{t}{\tau_{tp}})],$$

где  $T_{tp}$  и  $T_{max}$  – соответственно измеренное в момент времени  $t$  и истинные значения температуры, °C. Подставив в эту формулу  $t = \tau_{tp}$  получим

$$T(\tau_{tp}) = T\tau \cong 0,63 T_{max},$$

где  $T_{max} = \Delta T$ .

Таким образом, значение постоянной времени термопары  $\tau_{tp}$  соответствует времени нарастания сигнала термопары от условного нуля (температуры  $T_B$ ) до уровня 0,63 условного максимума – разности температур  $T_C - T_B$ .

Начальная температура соли варьировалась от 850 до 1100 °C. Для уменьшения погрешности измерений одну и ту же термопару использовали в нескольких экспериментах. На рис. 4 представлены наиболее показательные кривые переходных процессов.

С целью более точного определения температур  $T_C$  и  $T_B$  показания термопар подвергались статистической обработке по алгоритму скользящего среднего. При определении температуры  $T_\tau$  использовалась линейная интерполяция на интервале между соседними точками кривой термоцикла.

После обработки экспериментальных данных получены следующие результаты измерений постоянных времени термопар:

$\tau_{tp} = (1,5 \pm 0,1)$  с – для ТХА термопар, проволока диаметром 1,0 мм;  $\tau_{tp} = (1,0 \pm 0,1)$  с – для ТХА термопар, проволока диаметром 0,6 мм;  $\tau_{tp} = (0,6 \pm 0,1)$  с – для ТВР (ВР5/ВР20) термопар, проволока диаметром 0,2 мм.

С практической точки зрения полученные данные можно интерпретировать следующим образом. Если термопара имеет постоянную времени  $\tau_{tp}$ , то она может применяться для регистрации термоцикла с длительностью переднего фронта не менее  $4,7 \tau_{tp}$  (погрешность измерения максимального значения температуры не более 1 %). Для приведенных

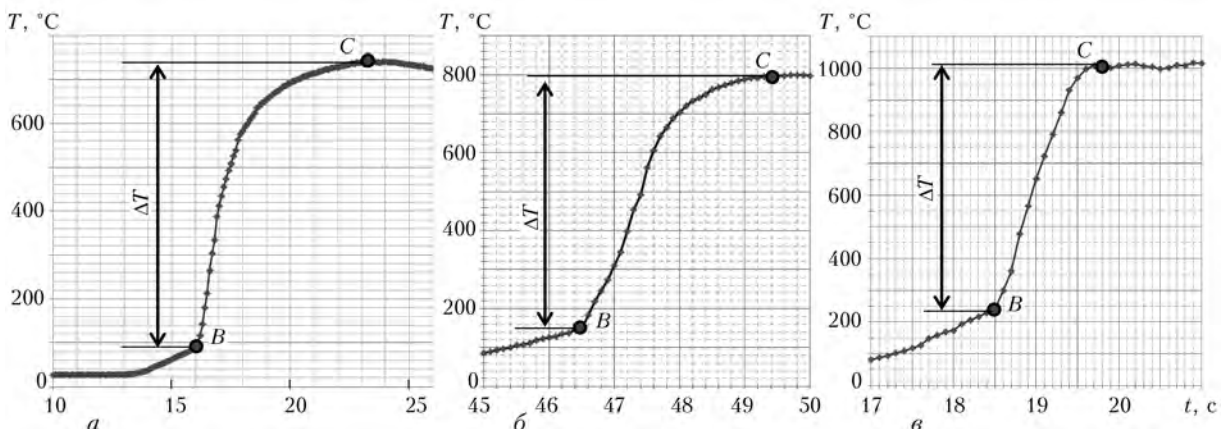


Рис. 4. Экспериментально полученные переходные характеристики термопар: а – типа ТХА, проволока диаметром 1,0 мм; б – типа ТХА, проволока диаметром 0,6 мм; е – типа ТВР (ВР5/ВР20), проволока диаметром 0,2 мм



экспериментальных данных можно записать следующие ограничения на минимальную длительность фронта термоцикла: 7,0, 4,7 и 2,8 с.

Полученные результаты исследований инерционных свойств термодпар позволяют обоснованно принимать решение относительно типа и конструкции термодпары для регистрации термоциклов при проведении исследований металлургических или сварочных процессов.

Таким образом, предложенная методика экспериментальной оценки инерционных свойств термодпар с использованием расплава поваренной соли NaCl позволила уточнить действительные постоянные времени ТХА и ТВР термодпар, конструкции которых не имеют термогильз или другой защитной аппаратуры. Сигналы ЭДС термодпар оцифровывались с частотой 10 раз/с с помощью специально

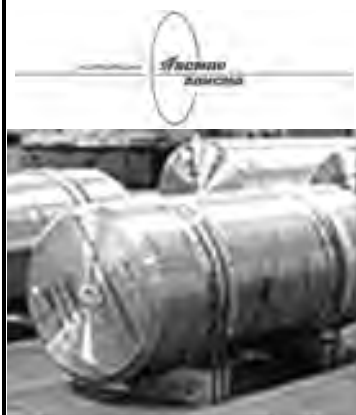
разработанного микропроцессорного контроллера, аналоговая часть которого выполнена на базе 24-разрядного сигма-дальта АЦП типа AD7794.

1. Фрэнкс Р. Математическое моделирование в химической технологии. — М.: Химия, 1971. — 272 с.
2. Алексеев С. В., Приймак С. В., Федик И. И. Особенности исследования энерговыделения в большой мишени, облучаемой пучком релятивистских протонов // Инж. физика. — 2000. — № 2. — С. 39–42.
3. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи / Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 512 с.
4. Рогельберг И. Л., Бейлин В. Сплавы для термодпар. Справ. изд. — М.: Металлургия, 1983. — 360 с.
5. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. — М.: Мир, 1985. — 520 с.
6. ГОСТ Украины Р 8.585–2001. Термодпары. Номинальные статические характеристики. — Введ. 21.11.2001.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 19.09.2012

[http // www.vsm-po.ru](http://www.vsm-po.ru)



## ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА»

### и Messier-Bugatti-Dowty договорились

#### о продлении действия долгосрочного соглашения на поставку титановой продукции

Российская титановая Корпорация ВСМПО-АВИСМА и фирма «Messier-Bugatti-Dowty» (Safran group) 10 июля 2012 объявили о продлении срока существующего соглашения на поставку титановых штамповок и их обработку.

Согласно подписанному документу, ВСМПО-АВИСМА продолжит поставлять Messier-Bugatti-Dowty и их субпоставщикам титановые штамповки и детали с черновой механической обработкой для обеспечения их требований по поставке шасси для программы В787. ВСМПО будет пре-

доставлять весь пакет необходимых услуг, включая услуги логистики, и обеспечит выполнение заказов точно в срок за счет работы широкой сети собственных дистрибьюторов, расположенных в США, Великобритании, Германии и Китае.

«Мы рады возможности продолжить наши отношения с Messier-Bugatti-Dowty, — сказал генеральный директор Корпорации ВСМПО-АВИСМА Михаил Воеводин, комментируя сделку. — Будучи эксклюзивным поставщиком титановых деталей шасси самого ответственного применения, мы готовы укрепить сотрудничество и обеспечить поддержку Messier-Bugatti-Dowty во время значительного роста объемов производства по программе Boeing 787. Этот контракт очень показателен для отражения наших целей, поскольку позволяет на деле продемонстрировать наши возросшие технологические и сервисные возможности для обеспечения необходимой поддержки наших заказчиков».

Messier-Bugatti-Dowty (Safran group) — мировой лидер в производстве шасси и тормозных систем самолетов. Компания реализует полный цикл производимой продукции — от дизайна до эксплуатационной поддержки и ремонтов. Messier-Bugatti-Dowty является партнером 33 компаний-лидеров по строительству гражданских, военных, служебных и региональных самолетов, участвует в более чем 22 тыс. программах, изготавливая ежедневно более 35 тыс. шасси.