

УДК 536.2

К.Б. ИСАЕВ, В.В. РЕМЕСЛО

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев

КОНСТРУКЦИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАСПЛАВА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Представлена конструкция устройства для получения расплава материалов в условиях одностороннего нагрева. Она предназначена для определения температурного поля в расплаве и подложке и на их основе определения теплопроводности расплава. Методика определения теплопроводности расплава материалов основана на граничном условии четвертого рода между подложкой и расплавом, решениях коэффициентной и граничной обратных задач теплопроводности. Представлены результаты экспериментального определения температурного поля в графитовой подложке и температура поверхности расплава олова, а также результаты определения температуры контакта расплав-подложка. Приведены результаты определения теплопроводности расплава олова. Получено удовлетворительное согласие с литературными данными.

Ключевые слова: *таблетка, расплав, коэффициент теплопроводности, термopара, температурное поле, обратная задача теплопроводности (ОЗТ).*

Введение

Исследование теплофизических характеристик твердых и жидких материалов при высоких температурах имеет как теоретическое, так и практическое значение. Например, жидкие металлы широко используются в атомной энергетике, ракетостроении, теплотехнике и т.п. Важнейшей характеристикой при разработке различных конструкций с жидким теплоносителем является его коэффициент теплопроводности. Для определения этой характеристики жидких материалов используются различные традиционные методы, например, метод радиальных температурных волн [1]. Традиционные методы, как стационарные, так и нестационарные требуют создания экспериментальных установок, реализующих тот или иной режим нагрева. С разработкой методов решения обратных задач теплопроводности и созданием надежных устройств измерения температур, которые работают совместно с ЭВМ, появилась возможность использовать различные источники тепла (высокотемпературные газовые потоки, концентрированная солнечная радиация и др.), что позволило определять теплопроводность материалов в широких диапазонах температур и скоростей нагрева с достаточной для практики точностью.

1. Конструкция устройства для получения расплава материалов

В данной конструкции (рис. 1) таблетка исследуемого материала (1) помещается в графитовый конический наконечник (9), закрытый торцом которого

нагревается. Этот наконечник ввинчивается в цилиндрическую (графитовую или стальную) втулку (6). В графитовый стержень (2) устанавливаются четыре термopары (3) (ВР 5/20, диаметр электродов 01.мм) на различном расстоянии от его поверхности.

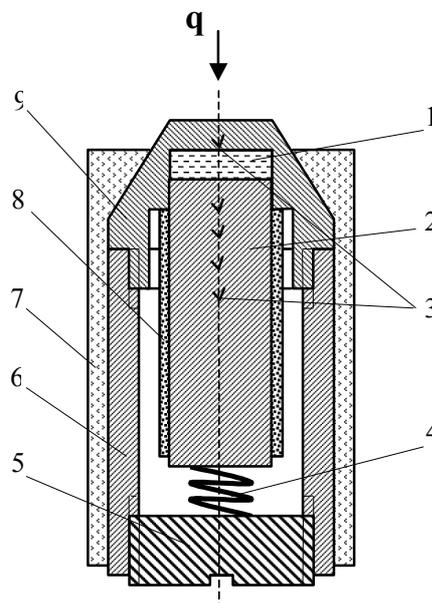


Рис. 1. Устройство для получения расплава материалов и определения экспериментального температурного поля в таблетке и графитовом стержне в условиях одностороннего нагрева: 1 – таблетка (расплав) материала; 2 – графитовый стержень (подложка); 3 – термopары; 4 – пружина; 5 – винт; 6 – втулка; 7 – тепловая изоляция боковой поверхности устройства; 8 – тепловая изоляция стержня 2; 9 – графитовый наконечник

Термопарные провода покрыты тонким слоем двуокиси иттрия (несколько мкм). Термопары установлены в отверстия и запрессованы порошком молибдена. Отверстия в стержне расположены таким образом, чтобы каждое последующее отверстие (начиная со второго) было смещено в своей плоскости на $15 - 20^\circ$ относительно предыдущего. Глубина сверления – половина диаметра стержня.

После установки термопар боковая поверхность графитового стержня покрывается 2 – 3 слоями кремнеземной нити для его теплоизоляции (8). Далее таблетка прижимается ко дну наконечника этим стержнем с помощью пружины (4). Диаметр таблетки составляет 10 мм, а толщина – 2 – 3 мм. Диаметр стержня также 10 мм.

В «холодный» конец втулки ввинчивается винт (5) (нержавеющая сталь) с пружиной. В наконечнике параллельно поверхности нагрева просверлено отверстие на глубину, равную $\frac{1}{2}$ его диаметра. Расстояние от отверстия до внутренней поверхности наконечника составляет несколько десятых долей мм. В это отверстие устанавливается термопара ВР 5/20, которая также запрессовывается порошком молибдена. После сборки устройства его боковая поверхность теплоизолируется с помощью асбестового шнура или втулки из материала ТЗМКТ-10 (7).

2. Методика определения теплопроводности расплава

Методика определения теплопроводности расплава аналогична методике определения теплопроводности покрытий [2]. Также рассматривается двухслойная одномерная тепловая модель – расплав (таблетка) и подложка (графитовый стержень). В математическом плане расплав и подложка – бесконечные пластины, на поверхностях которых заданы граничные условия первого рода. Предполагается, что в плоскости контакта расплав-подложка выполняется граничное условие четвертого рода.

Решается коэффициентная ОЗТ [3] с использованием показаний 4-х термопар в подложке. В результате решения этой ОЗТ получают температурную зависимость коэффициента теплопроводности материала стержня и расчетное температурное поле в пластине, которая представляет собой часть стержня между 1-й и 4-й термопарами.

Решение граничной ОЗТ – экстраполяция расчетных температур полиномом $1 \div 4$ -й степени с помощью программы Origin 4.10 для различных моментов времени до поверхности контакта, дает значение температуры контакта и производную $dT_2/dx|_{x=\delta}$ (т.е. со стороны стержня) в любой момент времени. Степень полинома выбирается из условия минимума ошибки определения T_{1-2} и первой про-

изводной по координате. Т.о., имеем температуру «холодной» поверхности расплава как функцию времени. Далее с помощью соотношения

$$\lambda_m = \lambda_s (dT_2/dx|_{x=\delta}) / (\Delta T_1 / \delta) \quad (1)$$

определяется коэффициент теплопроводности исследуемого материала, как в твердом, так и жидком состояниях. Здесь: λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; x – координата; ΔT_1 – перепад температур по толщине расплава; δ – толщина расплава. Индексы: s – подложка (substrate), m – расплав (melt), 1 – расплав, 2 – подложка.

Также предполагается, что температура в расплаве является линейной функцией координаты. Температурой отнесения коэффициента теплопроводности расплава является температура горячего торца подложки (T_{1-2}) в соответствующий момент времени.

3. Эксперимент

Нагрев устройства, представленного на рис. 1, проводили в расплавленном и перегретом свинце для получения одномерного теплового потока, поступающего в устройство. Результаты этого эксперимента представлены на рис. 2. Это показания термопар в 4 сечениях цилиндрического графитового стержня. И температура в наконечнике (w). Учитывая малую толщину слоя графита между таблеткой и этой термопарой, а также высокую теплопроводность графита (рис. 3), показания этой термопары практически соответствуют изменению температуры на «горячем» торце таблетки (расплава).

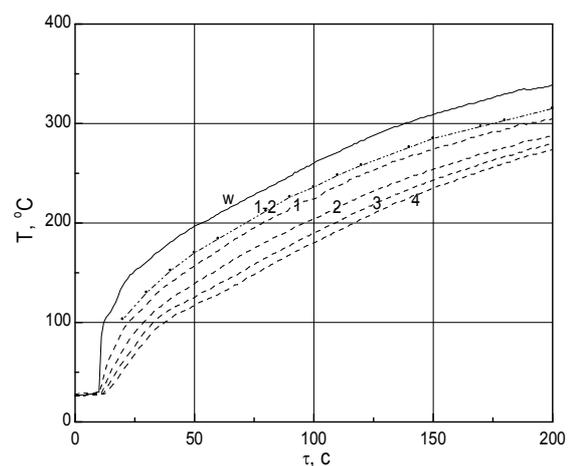


Рис. 2. Температурное поле в устройстве (рис. 1) для системы олово-графит:

w – температура «горячей» поверхности таблетки; 1-2 – температура контакта таблетка-стержень, восстановленная из решения граничной ОЗТ; 1-4 – показания четырех термопар в графитовом стержне

Регистрация показаний термопар осуществлялась с помощью системы автоматизации теплофизи-

ческого эксперимента [4], в которой используются: два четырехканальных модуля WAD-AIK-USB аналогового ввода с поканальной гальванической развязкой входных каналов и интерфейсом RS-485, а также преобразователь интерфейсов WAD-RS-232/USB/485-BUS.

В таблице 1 приведены расстояния термопар от поверхности контакта таблетка-подложка для графитового стержня.

Таблица 1
Расстояния термопар от поверхности контакта

ТП1, мм	ТП2, мм	ТП3, мм	ТП4, мм
1,9	4,4	6,8	8,2

Толщина таблетки Sn до испытаний составляла 2.6 мм.

Обработка экспериментальной информации осуществлялась с помощью программы «Администратор». Эта программа позволяет настроить каналы на соответствующий тип термопар, преобразовать аналоговый сигнал термопары в цифровой и т.д. Экспериментальная информация в ней представляется как в графическом, так и цифровом виде в реальном масштабе времени. Модули, преобразователь интерфейсов и программа «Администратор» разработаны и созданы компанией АКОН.

4. Результаты определения теплопроводности жидкого Sn

Полученная экспериментальная информация была обработана по вышеописанной методике, с использованием температурной зависимости удельной теплоемкости графита [5]. Результаты решения коэффициентной ОЗТ для графитового стержня приведены на рис. 3.

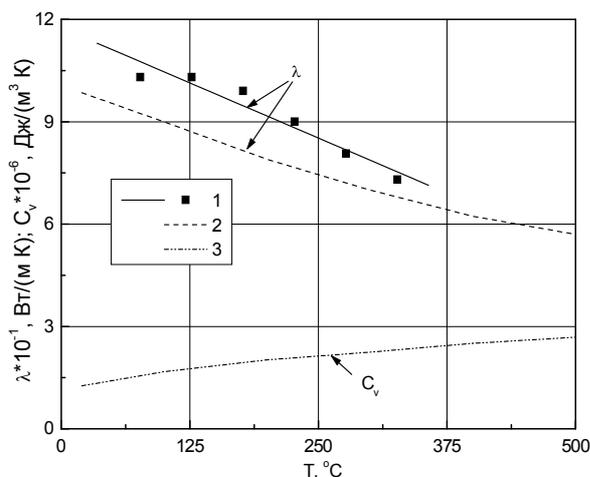


Рис. 3. Теплофизические характеристики графита: теплопроводность: 1 – стержень от батарейки «Кодак»; 2 – графит ПРОГ-2400 [6]; удельная объемная теплоемкость: 3 – графит ПРОГ-2400 [5]

В данной работе использовали стержень от батарейки Кодак, в состав графита которого входит некоторое количество меди. Видимо по этой причине значения теплопроводности материала стержня лежат несколько выше значений этой характеристики чистого графита (рис. 3).

На рис. 4 представлены температурные зависимости теплопроводности твердого и расплавленного олова. Для твердого вещества получено практически полное совпадение с данными для поликристалла.

Расхождение с данными работы [1] уменьшается с ростом температуры при приближении температурного поля в системе расплав-стержень к стационарному состоянию.

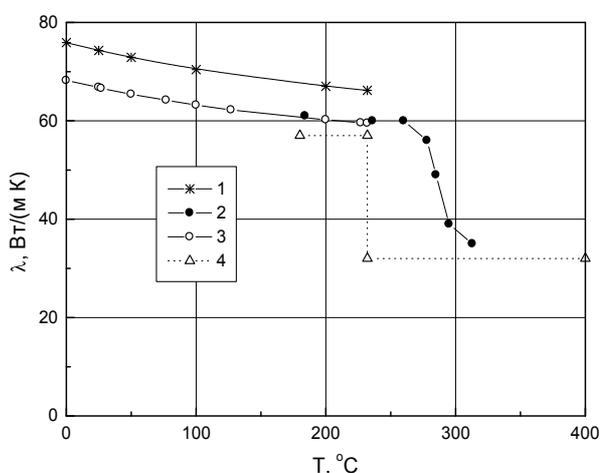


Рис. 4. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности олова: 1 – данная методика; 2 – перпендикулярно с-оси [7]; 3 – поликристалл [7]; 4 – [1]

Заключение

Разработана конструкция устройства, позволяющая получать расплав небольших образцов исследуемых материалов при различных видах одностороннего нагрева. Например, при нагреве в фокусе концентратора солнечной энергии температура нагреваемого торца наконечника может достигать 3000 °C.

Полученное в процессе нагрева температурное поле используется для определения теплопроводности расплава по методике, описанной в работе. Работоспособность методики продемонстрирована на примере олова, как в твердом, так и жидком состоянии.

Для реализации предложенной методики нет необходимости в знании теплофизических характеристик материала стержня. Достаточно иметь значение удельной объемной теплоемкости материала этого стержня при комнатной температуре, а его

теплопроводность определяется решением коэффициентной ОЗТ в процессе реализации методики.

Литература

1. Филиппов Л.П. Измерение тепловых свойств твердых и жидких металлов при высоких температурах / Л.П. Филиппов. – М: МГУ, 1967. – 325 с.
2. Методика определения теплопроводности газотермических покрытий / С.В. Бучаков, Ю.И. Евдокименко, К.Б. Исаев и др. // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 3. – С. 34-38.
3. Круковский П.Г. Обратные задачи тепло-массопереноса (общий инженерный подход) / П.Г. Круковский. – К.: ИТТФ НАНУ, 1998. – 224 с.
4. Исаев К.Б. Теплофизические характеристи-

ки материалов в широких диапазонах температур и скоростей нагрева / К.Б. Исаев. – К.: Куприянова, 2008. – 240 с.

5. Шейндлин А.Е. Энтальпия и теплоемкость графита в интервале температур 273 – 3650К / А.Е. Шейндлин, И.С. Белевич, И.Г. Кожевников // ТВТ. – 1972. – Т. 10, № 5. – С. 297-1001.

6. Исследование теплопроводности и электропроводности силицированных графитов / А.И. Лутков, В.И. Волга, Б.К. Дымов и др. // ТВТ. – 1972. – Т. 10, № 5. – С. 1002-1006.

7. Теплопроводность твердых тел: справочник / А.С. Охотин, Р.П. Боровикова, Т.В. Нечаева, А.С. Пушкарский; под общ. ред. А.С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.

Поступила в редакцию 1.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, зав. отделом М.Б. Штерн, Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев, Украина.

КОНСТРУКЦІЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ РОЗПЛАВУ МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

К.Б. Исаев, В.В. Ремесло

Представлена конструкція пристрою для отримання розплаву матеріалів в умовах однобічного нагріву. Вона призначена для визначення температурного поля в розплаві і підкладці, а на їх основі – визначення теплопровідності розплаву. Методика визначення теплопровідності розплаву матеріалів заснована на граничному умови четвертого роду між підкладкою і розплавом, рішеннях коефіцієнтний і граничної обернених задач теплопровідності. Представлені результати експериментального визначення температурного поля в графітової підкладці і температура поверхні розплаву олова, а також результати визначення температури контакту розплав-підкладка. Наведено результати визначення теплопровідності розплаву олова. Отримано задовільну згоду з літературними даними.

Ключові слова: таблетка, розплав, коефіцієнт теплопровідності, термопара, температурне поле, обернена задача теплопровідності (ОЗТ).

DESIGN OF THE INSTALLATION FOR PRODUCTION OF MELT MATERIALS AND METHOD FOR DETERMINATION OF ITS THERMAL CONDUCTIVITY

K.B. Isayev, V.V. Remeslo

The installation design for production of melt of materials in conditions of one sided heating is submitted. It is intended for determination of a temperature fields in melt and substrate. On the basis of these fields the thermal conductivity of melt is determined. The method for determination of melt materials thermal conductivity is based on a fourth sort boundary condition between a substrate and melt, decisions of coefficient and boundary inverse heat conduction problems. The results of experimental determination of a temperature field in a graphite substrate and temperature of a surface of tin melt, and also results of determination of contact temperature of a melt-substrate are submitted. The results of determination of thermal conductivity of tin melt are given. The satisfactory consent with the literary data is received.

Key words: a tablet, melt, thermal conductivity, thermocouple, temperature field, inverse heat conduction problem (IHCP).

Исаев Константин Борисович – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев, Украина, e-mail: isayev_k@gala.net.

Ремесло Виктор Васильевич – главный технолог Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев, Украина.