

3. **Герашенко О. А.** Основы теплотрии. Киев: Наукова думка, 1971.

4. **Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.** Теплопередача: Учеб. пособие. М.: Энергия, 1975.

5. **Зонова А. Д., Черепанов В. Я.** Исследование теплотрического метода неразрушающего контроля параметров теплоносителя в системах теплоснабжения // Сб. матер. VII Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2011». Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5. Ч. 2. С. 247—251.

6. **Вихарева Н. А. и др.** Разработка и исследование новых методов и эталонных средств метрологического обеспечения теплотрии // Приборы. 2012. № 10(148). С. 1—8.

7. **Зонова А. Д., Черепанов В. Я.** Методика экспресс-измерений тепловой мощности отопительных приборов неразрушающим методом // Сб. матер. VIII Междунар. науч. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012». Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 5. Ч. 2. С. 158—163.

8. **Зонова А. Д.** Экспериментальные исследования теплотрического метода и прибора для измерений параметров теплоносителя // Вестник СГГА (Новосибирск). 2012. Вып. 3(19). С. 116—123.

9. **Краснов В. А.** Теплотрический метод определения тепловой энергии в судовых теплообменных системах // Вестник АГТУ (Астрахань). Морская техника и технология. 2010. № 1. С. 136—140.

10. **Зонова А. Д., Краснов В. А., Черепанов В. Я.** Теплотрические метод и средства измерений параметров теплоносителя // Приборы. 2013. № 7(157). С. 1—7.

11. **Зонова А. Д., Черепанов В. Я.** Анализ источников погрешности измерений параметров теплоносителя неразрушающим теплотрическим методом // Сб. матер. IX Междунар. науч. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013»: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013». Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. С. 46—51.

Дата принятия 29.11.2013 г.

621.12.24

Исследование теплопроводности, теплоемкости, энтальпии сплавов с эффектами памяти системы Cu-Mn в широком интервале температур

М. М. САФАРОВ*, Х. С. САДЫКОВ**, С. Г. РИЗОВЕВ***

* Филиал московского энергетического института (национального исследовательского университета), Душанбе, Таджикистан, e-mail: mahmad1@list.ru

** Таджикский технический университет им. акад. М. С. Осими, Душанбе, Таджикистан

*** Дангаринский государственный университет, Дангара, Таджикистан

Приведены результаты исследования теплопроводности, теплоемкости и энтальпии сплава с эффектом памяти системы Cu—Mn в зависимости от температуры 300—1550 К и концентрации Mn от 0 до 100 %. В процессе обработки экспериментальных данных получены эмпирические уравнения.

Ключевые слова: теплопроводность, теплоемкость, энтальпия, сплавы с эффектом памяти, метод монотонного разогрева.

The results of thermal conductivity, heat capacity and enthalpy of alloys with memory of the system Cu—Mn effect depending from temperature 300—1550 K and concentrations of Mn from 0 to 100 % are presented. During the processing of experimental data a number of empirical equations is obtained.

Key words: thermal conductivity, heat capacity, enthalpy, alloys with memory effect, monotonic heating method.

Исследования теплопроводности λ и энтальпии H сплавов с эффектами памяти системы Cu—Mn в широком интервале температур T направлены на уточнение зависимости $\lambda = f(T)$. Для развития теории жидких металлов большое значение имеют экспериментальные исследования теплофизических свойств металлов в области высоких температур и импульсных давлений. Цель работы — получение достоверных экспериментальных данных о λ и H указанных сплавов и составление уравнения для их расчета. Измерения λ выполняли на установке, реализующей метод монотонного разогрева [1, 2]. Образцы имели цилиндрическую форму. Относи-

тельные погрешности измерений λ и теплоемкости с при доверительной вероятности 0,95 составляли соответственно 4,5 и 3,2 %. Установку градуировали по меди и алюминию, используя значения их λ , приведенные в [3], по методике, изложенной в [4].

Поглощенную энергию и электрическое сопротивление сплавов измеряли на проволочных образцах в процессе их импульсного нагревания электрическим током i большой плотности. Использовали проволоку диаметром $2a = 0,1...0,2$ мм, плотность тока в импульсе составляла $j = i/(\pi a)^2 = (1...5) \cdot 10^6$ А/см² при длительности $\tau = 10^{-4}...10^{-5}$ с. Благодаря быстрому вве-

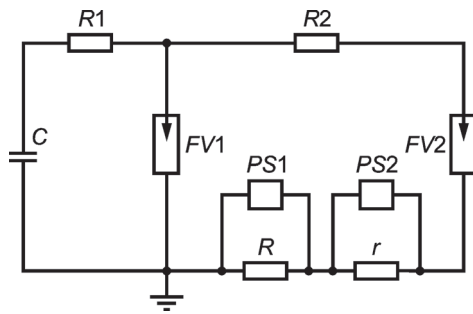


Схема получения импульсного тока:

C — батарея конденсаторов; $R1, R2$ — балластные резисторы; $FV1, FV2$ — разрядники; R — проволоочный образец; r — эталонный резистор; $PS1, PS2$ — осциллографы

дению джоулеа тепла W и малой длительности эксперимента были исключены трудности, характерные для высокотемпературных измерений в стационарных условиях на

установке, заимствованной из [5]. Преимущество импульсного нагрева состоит в однородности нагревания исследуемого образца, что позволяет полученные результаты отнести к его массе [5].

Импульс нагревающего тока создавали при разряде батареи конденсаторов C , заряженной до высокого напряжения, через балластные резисторы $R1, R2$ и эталонный резистор r , включенный последовательно с проволоочным образцом R (см. рисунок). В течение эксперимента записывали осциллограммы напряжений $V_R(t)$ и $V_r(t)$ (последняя соответствовала осциллограмме нагревающего тока). В различные моменты времени t вычисляли сопротивление проволоки $R(t) = V_R(t)/V_r(t)$ и поступившую в нее джоулеву теплоту.

Расчетную формулу для теплоемкости расплавленных исследуемых образцов получили на основе закона теплового баланса [10]:

$$c_p = I^2 R \Delta t / (m \Delta T), \quad (3)$$

где I — сила тока; R — сопротивления проводника; m — масса образца; ΔT — разность температуры; $\Delta t = t_2 - t_1$.

В табл. 1, 2 приведены результаты экспериментального определения λ и c_p рассматриваемых сплавов при различных температурах в одиннадцати образцах разного состава: 1 — (90 % Cu+10 % Mn); 2 — (80 % Cu+20 % Mn); 3 — (70 % Cu+30 % Mn); 4 — (60 % Cu+40 % Mn); 5 — (50 % Cu+50 % Mn); 6 — (40 % Cu+ 60 % Mn); 7 — (30 % Cu+70 % Mn); 8 — (20 % Cu+80 % Mn); 9 — (10 % Cu+ 90 % Mn); 10 — (47,7 % Cu+52,3 % Mn); 11 — (11,6 % Cu+88,4 % Mn).

Как следует из табл. 1, зависимости $\lambda(T)$ имеют точки перегиба в диапазоне 700—750 К. Согласно табл. 2 теплоемкость с ростом температуры увеличивается.

Отметим, что для проволоочного образца массой m джоулеа теплота затрачивается на увеличение внутренней энергии и работу расширения при неизменном внешнем давлении 1 атм (0,101 МПа). Таким образом, в данном эксперименте при отсутствии тепловых потерь удельная энергия $w(t) = W(t)/m\omega$ фактически равна энтальпии металла, отсчитываемой от энтальпии при комнатной температуре H_{293} . В табл. 3 приведены температуры ликвидуса T_L , солидуса T_C , разливки T_p и плотность γ при температуре 20 °С для меди и латуни, заимствованные из [6—9], а также теплоемкость c_p , погонное электрическое сопротивление $\rho_{ж}$ и плотность $\gamma_{ж}$ металлов в жидком состоянии из [5]. Существенное отличие рассматриваемой методики от стационарных измерений состоит в том, что при импульсном нагревании теплоту $H_{пл}$ измеряли независимо от энтальпии твердой и жидкой фаз в точке плавления. Если считать данные из [3] наиболее достоверными результатами стационарных измерений как вы-

Таблица 1

Теплопроводность сплава с эффектом памяти системы Cu—Mn в зависимости от температуры для разных образцов

Опыт	T, К	λ , Вт/(м · К), образцов								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	300	141,7	126,7	111,8	96,8	81,7	66,8	57,1	36,6	21,8
2	350	195,8	175,4	154,3	133,6	112,9	92,2	79,3	50,7	30,1
3	400	249,8	223,3	196,9	170,4	144,0	117,6	101,6	64,8	38,3
4	450	285,6	255,4	225,2	195,2	164,7	134,5	116,1	74,1	43,1
5	500	321,4	287,4	253,4	219,4	185,4	151,3	130,8	83,3	49,3
6	550	343,5	298,5	259,5	224,5	189,6	158,2	133,3	85,2	50,2
7	600	365,7	300,7	264,7	229,0	193,5	158,0	136,5	87,0	51,5
8	650	371,5	318,5	281,5	243,3	205,6	167,8	145,5	92,5	54,7
9	700	377,3	337,3	322,9	257,5	217,6	177,6	153,5	97,8	57,9
10	750	367,8	327,8	302,6	264,0	212,1	172,3	157,3	102,3	56,3
11	800	358,2	320,2	282,2	244,5	206,6	168,7	145,8	92,9	54,9
12	850	331,9	296,5	302,8	226,8	191,4	180,5	155,7	86,1	50,1
13	900	305,9	273,6	241,2	208,8	176,5	144,1	124,5	79,3	46,9
14	950	293,1	262,1	210,1	178,1	156,1	116,7	106,9	76,0	29,3

Таблица 2

Теплоемкость сплава с эффектом памяти системы Cu—Mn в зависимости от температуры для разных образцов

Опыт	T, К	c_p , Дж/(кг · К), образцов			Опыт	T, К	c_p , Дж/(кг · К), образцов		
		2	10	11			2	10	11
1	300	441,7	228,7	507,3	14	950	562,1	294,1	659,1
2	350	451,3	233,9	519,2	15	1000	570,3	296,4	657,6
3	400	460,8	239,2	530,8	16	1050	582,8	302,8	682,4
4	450	469,7	244,7	537,7	17	1100	590,2	312,8	658,7
5	500	478,4	249,8	554,0	18	1150	599,6	318,6	705,8
6	550	482,7	252,7	561,3	19	1200	608,9	323,4	717,4
7	600	495,7	260,3	577,4	20	1250	618,3	328,3	729,1
8	650	507,4	265,4	583,4	21	1300	628,7	333,9	740,8
9	700	518,3	270,8	600,5	22	1350	637,3	337,3	752,3
10	750	526,7	277,7	612,7	23	1400	645,9	344,5	764,1
11	800	535,4	281,3	624,0	24	1450	655,4	350,4	775,8
12	850	544,8	286,8	636,4	25	1500	664,8	354,9	787,5
13	900	553,6	291,6	647,4	26	1550	671,4	360,3	799,1

Таблица 3

Теплофизические свойства меди и сплавов латуни

Сплав	T_c , К	$T_{пл}$, К	ΔT , К	T_p , К	$H_p - H_{293}$, кДж/кг	$\rho_{ж} \cdot 10^8$, Ом · м	$\gamma_{ж}$, кг/м ³	γ , кг/м ³	c_p , Дж/(кг · К)
Си	1356	1356	—	1473	778	21,0	8300	8900	544
Л80	1238	1273	35	1433	714	33,0	8100	8660	476
Л68	1182	1211	29	1413	698	38,5	8000	8500	475
Л63	1173	1183	10	1373	—	40,0	7800	8500	471

полненные в более позднее время для твердого ($H_{тв}$) и жидкого ($H_{ж}$) состояний, то отличие от них результатов опыта с импульсным нагревом составляют 5 % для $H_{тв} - H_{293}$, 4 % для $H_{ж} - H_{293}$ и 2 % для $H_{пл}$. С учетом погрешностей измерений сопоставляемых величин можно утверждать, что данные импульсных и стационарных опытов достаточно близки. Оценка погрешностей измерений энтальпии $H - H_{293}$ в данной работе составляет 5 %, электрического сопротивления 3 %.

Сравнение значений $H_{ж} - H_{293}$ в точке плавления сплавов, полученных в [5], с другими данными показывает удовлетворительное соответствие энтальпий для широкого интервала температур. Так, учитывая энтальпию (714 кДж/кг) жидкой латуни Л80 при $T_p = 1433$ К и ее теплоемкость из табл. 3, получаем для точки плавления $H_{ж} - H_{293} = 638$ кДж/кг, согласно [5] имеем 648 кДж/кг; аналогично $H_{ж} - H_{293} = 602$ кДж/кг для латуни Л68 в данной работе и 610 кДж/кг в [5].

На основе экспериментальных значений λ , c_p исследуемых сплавов и закона соответствующих состояний получены эмпирические уравнения

$$\lambda = \left[-1,69 \left(\frac{T}{T_1} \right)^2 + 3,87 \left(\frac{T}{T_1} \right) - 1,09 \right] (371 - 3,55 n_{Mn});$$

$$c_p = \left[0,355 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 0,665 \right] (0,021 n_{Mn}^2 + 0,41 n_{Mn} + 457,3),$$

где n_{Mn} — концентрация Mn в сплаве, по которым можно рассчитать указанные теплофизические характеристики неисследованных сплавов с эффектами памяти системы Си—Mn в пределах погрешности опыта.

Выводы. Разработана и использована экспериментальная установка для измерений электрической проводимости,

теплопроводности, теплоемкости и энтальпии сплавов методом нагретой нити. Эти параметры впервые измерены для сплавов с эффектами памяти системы Си—Mn в широком интервале температур 300—1550 К. Установлено, что с ростом температуры и концентрации Mn теплопроводность уменьшается, а теплоемкость и энтальпия увеличиваются. При обработке и обобщении экспериментальных данных получены эмпирические уравнения.

Зависимости теплопроводности указанных сплавов имеют точки перегиба в диапазоне 700—750 К.

Литература

1. Платунов Е. С. Методы скоростных измерений теплопроводности и теплоемкости материалов в широком интервале температур // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 1961. Т. 4. № 4. С. 90—97.
2. Платунов Е. С. и др. Теплофизические измерения: Учеб. пособие / Под. ред. Е. С. Платунова. СПб.: Энергия, 2010.
3. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М., Металлургия, 1989.
4. Канаев А. Т. и др. Исследование зависимости электросопротивления меди и ее сплавов от энтальпии в твердом и жидком состояниях // Научная мысль информационного века: Сб. трудов науч. конф. Варшава, 2010. С. 34—37.
5. Канаев А. Т. и др. Исследование теплофизических свойств меди и ее сплавов в твердом и жидком состояниях // Там же. С. 54—58.
6. Канаев Н. А., Лебедев С. В., Саватимский А. И. Исследование теплофизических свойств меди и ее сплавов в твердом и жидком состояниях // Изв. АН СССР. Металлы. 1989. № 3. С. 48—55.
7. Канаев Н. А., Лебедев С. В., Канаев А. Т. Исследование зависимости электросопротивления меди и ее сплавов // Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия. 1998. № 2. С. 36—39.
8. Лифшиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л. Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1990.
9. Фарбман С. А., Колобнев И. Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1988.
10. Сафаров М. М. Теплофизические свойства простых эфиров и водных растворов гидразина в зависимости от температуры и давления: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. Душанбе, 1993.

Дата принятия 04.10.2013 г.