рений. Поэтому дополнительно исследовалась относительная теплоемкость железа Армко, имеющего в интервале температур 500—1400 К два фазовых перехода [7]. Исследованный материал содержал следующие примеси, в мас.%: углерод — 0,025; марганец — 0,026; сера — 0,024; фосфор — 0,006; медь — 0,2.

Привязка результатов относительных измерений к абсолютным значениям [8] осуществлялась при температуре 600 К. На рис. 3 приведены результаты данной работы и [8]. Расхождение результатов при температурах выше 1050 К может быть связано с влиянием примеси. Как известно, загрязнение железа больше сказывается на его свойствах при переходе от ОЦК решетки к ГЦК вблизи 1180 К. В остальной области температур результаты предлагаемой работы и справочные данные согласуются удовлетворительно.

Данная работа показала, что металлическое покрытие из хрома позволяет стабилизировать оптические характеристики поверхности образцов и способствует повышению точности измерения теплоемкости материалов.

Литература

1. *Филиппов Л. П.* Измерение теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева. М.: Энергоиздат, 1984. 104 с.
2. *Ивлиев А. Д., Зиновьев В. Е.* // ТВТ. 1980. Т. 18. № 3. С. 533.
3. *Куриченко А. А., Ивлиев А. Д., Зиновьев В. Е.* // ТВТ. 1986. Т. 24. № 3. С. 493.
4. *Филиппов Л. П.* Измерение тепловых свойств твердых и жидких металлов при высоких температурах. М.: Изд-во МГУ, 1967. 134 с.
5. *Черкез М. Б.* Хромирование. Л.: Машиностроение, 1971. 112 с.
6. Теплофизические измерения и приборы/Под ред. Г. С. Платунова. Л.: Машиностроение, 1986. 256 с.
7. *Зиновьев В. Е.* Кинетические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1984. С. 167.
8. Selected Values of the Thermodynamic Properties of the Elements. ASM, Ohio, 1973. 636 p.

Свердловский горный институт

Поступило в редакцию 04.12.89

УДК 543.8

© 1991 г.

В. И. Стремоусов, В. В. Текучев

ИЗУЧЕНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ ВИСМУТ — КАДМИЙ — ОЛОВО В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

В ряде работ [1—3] показана успешная применимость формулы, предложенной Кудрявцевым в [4], для расчета скорости ультразвука в жидкометаллических системах. Формула является следствием предположения об аддитивности внутренней энергии при образовании смесей

$$c^2 = \sum x_i c_i^2, \tag{1}$$

где x_i — массовые доли компонентов; c_i — скорость звука в них. Погрешность при подобных расчетах не превышает 6—8%. В данной работе формула (1) использовалась для изучения упругих свойств жидкометаллической системы Bi — Cd — Sn. Данные скорости звука в компонентах взяты из [1, 5, 6].

Политермы для изученных сплавов можно интерпретировать линейной формулой

$$c = c_0 - \frac{dc}{dT}(T - T_0). \tag{2}$$

Значения параметров формулы (2) приведены в таблице.

С помощью гидродинамического соотношения

$$\beta_s = 1/\rho c^2 \tag{3}$$

рассчитана адиабатическая сжимаемость сплавов изучаемой системы. Плотности компонентов взяты из [7], плотности сплавов вычислялись по интерполяционной формуле

$$1/\rho = \sum x_i/\rho_i. \tag{4}$$

Справедливость подобных расчетов подтверждена в работе [8] и следует из того, что теплоты смешения данных металлов малы по сравнению с полной внутренней энергией и не превышают 2—3 Дж/моль. Поскольку расчет плотностей сплавов при этих условиях допускает погрешность не более 1—2%, то можно считать, что погрешность расчета сжимаемости по формуле (3) не превышает 8—10%.

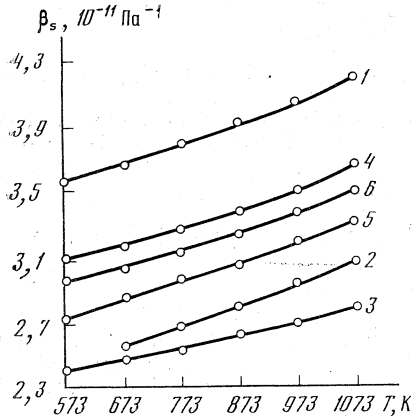

Рис. 1

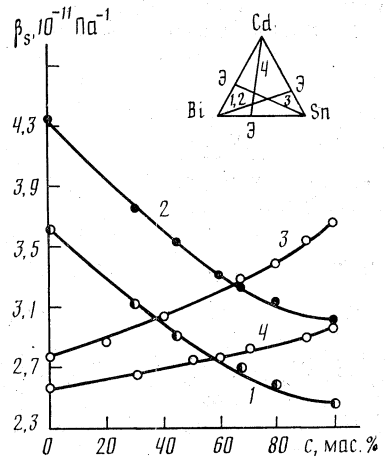

Рис. 2

Рис. 1. Зависимость адиабатической сжимаемости от температуры: *1* – Bi, *2* – Cd, *3* – Sn, *4* – Bi70–Cd10–Sn20, *5* – Bi40–Cd20–Sn40, *6* – Bi54–Cd36–Sn10

Рис. 2. Изотермы адиабатической сжимаемости для трех разрезов: *1* – Bi–(Cd–Sn)$_э$, 573 К, *2* – Bi(Cd–Sn)$_э$, 1073 К, *3* – Sn–(Bi–Cd)$_э$, 1073 К, *4* – Cd–(Sn–Bi)$_э$, 673 К

На рис. 1 приведены полученные зависимости адиабатической сжимаемости от температуры.

В [9] было установлено, что в жидких металлах, двойных и тройных системах имеет место соотношение

$$\beta_s \rho^3 = \text{const}. \tag{5}$$

Для системы Bi – Cd – Sn также наблюдается выполнимость этого правила. Рост величины $\beta_s \rho^3$ в интервале 573–1073 К для отдельных расплавов не превышает 5%, для большинства – 2%.

Поскольку выполнимость формулы (5) подтверждена для ряда других металлов и сложных систем, есть основание считать это правило общим для металлических жидкостей.

На рис. 2 приведены изотермы адиабатической сжимаемости для трех разрезов. Они представляют собой кривые, обращенные выпуклостями к оси составов, что свидетельствует о небольшом преобладании взаимодействия разноименных атомов. С изменением температуры (кривые *1*, *2*) характер связи не меняется. С помощью соотношения

$$\beta_T = \beta_s + \frac{Tk^2}{\rho^3 C_p} \tag{6}$$

была рассчитана изотермическая сжимаемость β_T (C_p – мольная изобарная теплоемкость, $k = -(\partial\rho/\partial T)_p$. Значения C_p для металлов взяты из [7], для сплавов вычислены с помощью линейной интерполяции.

Состав, мас.%			T_0, К	c_0, 10^3 м/с	dc/dT, м/(с·К)	β_{T_0}, 10^{-11} Па$^{-1}$	a, 10^{-4} К$^{-1}$	γ_0	b, 10^{-4} К$^{-1}$
Bi	Cd	Sn							
100	0	0	573	1,655	0,21	4,02	4,9	1,103	1,74
0	100	0	673	2,215	0,35	3,17	7,2	1,240	3,42
0	0	100	573	2,456	0,24	2,63	6,1	1,099	1,70
0	32	68	573	2,392	0,27	2,78	5,8	1,126	1,98
56	0	44	573	2,046	0,21	3,14	4,5	1,105	1,82
60	40	0	573	1,915	0,26	3,52	5,7	1,144	2,50
70	10	20	573	1,905	0,22	3,45	5,3	1,112	1,84
46	18	36	573	2,084	0,24	3,29	5,4	1,114	1,86
40	20	40	573	2,126	0,24	3,08	5,6	1,121	1,94
32	22	46	573	2,180	0,26	3,01	5,6	1,121	1,92
20	26	54	573	2,263	0,26	2,91	5,7	1,123	1,96
18	70	12	573	2,182	0,31	3,00	6,7	1,174	3,06
40	30	30	573	2,103	0,25	3,07	5,4	1,134	2,28
50	10	40	573	2,071	0,23	3,13	4,8	1,113	1,94
12	8	80	573	2,358	0,24	2,74	4,6	1,107	1,82
23	17	60	573	2,260	0,24	2,90	4,6	1,119	1,78
48	32	20	573	2,035	0,25	3,27	5,3	1,134	2,30
54	36	10	573	1,976	0,26	3,38	5,5	1,137	2,36
28	50	22	573	2,151	0,28	3,04	5,9	1,150	2,56

Результаты расчета свидетельствуют, что температурная зависимость изотермической сжимаемости может быть интерпретирована формулой

$$\beta_T=\beta_{T_0}\exp\left[a(T-T_0)\right], \tag{7}$$

где β_{T_0} – значение при некоторой температуре T_0; a – константа для данного сплава (значения указанных параметров приведены в таблице).

Известные значения адиабатической и изотермической сжимаемостей позволяют с достаточной точностью (10–15%) вычислить величину важного параметра – коэффициента Пуассона

$$\gamma=C_p/C_v=\beta_T/\beta_s. \tag{8}$$

Как и для большинства жидкостей, этот параметр линейно растет с температурой

$$\gamma=\gamma_0+b(T-T_0). \tag{9}$$

Константы γ_0, b, T_0 приведены в таблице.

Полученные данные для ряда упругих характеристик расплавов системы Bi – Cd – Sn, плавно изменяющиеся с концентрацией, позволяют сделать вывод об отсутствии химических соединений среди компонентов: по своим свойствам система может классифицироваться как близкий к идеальному раствор.

Литература

1. *Стремоусов В. И., Марков Б. Г.* // ЖФХ. 1972. Т. 46. № 3. С. 742.
2. *Стремоусов В. И., Соломин Б. А.* // ЖФХ. 1976. Т. 50. № 3. С. 646.
3. *Стремоусов В. И., Текучев В. В.* // ЖФХ. 1976. Т. 50. № 9. С. 2373.
4. *Кудрявцев Б. Б.* Применение ультразвуковых методов в практике физико-химических исследований. М.: Гостехиздат, 1952.
5. *Стремоусов В. И., Марков Б. Г.* // ЖФХ. 1972. Т. 46. № 5. С. 1325.
6. *Стремоусов В. И., Рубцов А. С., Школьников В. А.* // ЖФХ. 1968. Т. 42. № 1. С. 69.
7. *Чиркин В. С.* Теплофизические свойства материалов. М.: Физматгиз. 1959.
8. *Текучев В. В.* // Исследование свойств жидких двухкомпонентных сплавов на основе алюминия. Дис. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук. М.: ВЗМИ, 1987. 202 с.
9. *Стремоусов В. И., Рубцов А. С.* // ТВТ. 1975. Т. 13. № 6. С. 1298.

Волгоградский государственный педагогический институт им. А. С. Серафимовича

Поступило в редакцию 28.09.89

УДК 532.52:536.423 © 1991 г.

В. Е. Виноградов, Е. Н. Синицын

ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОНАСЫЩЕННОЙ ВОДЫ ЧЕРЕЗ КОРОТКИЕ СОПЛА

Экспериментальные исследования истечения вскипающих жидкостей через короткие каналы ($l/d<3$, l – длина канала, d – диаметр) показали, что в широком интервале температур расход вскипающей жидкости (пентан, гексан, дибромтетрафторэтан [1]; вода [2], азот, кислород [3]) близок к результату расчета по уравнению Бернулли, справедливому для несжимаемой жидкости

$$g=\mu\sqrt{2\Delta P\rho'}. \tag{1}$$

Здесь g – удельный массовый расход; ΔP – перепад давления в канале; ρ' – плотность жидкости при температуре опыта; μ – гидравлический коэффициент расхода, определяемый опытным путем по истечению холодной жидкости. Значительное отклонение экспериментальных расходов от расчетных наблюдается при температурах, превышающих температуру достижимого перегрева жидкости $T_п$. При атмосферном давлении $T_п\simeq0{,}9\,T_к$, где $T_к$ – критическая температура жидкости. Для воды $T_п=0{,}9\,T_к=310°$ С. В области температур $T>T_п$ наблюдается бурный рост числа термофлуктуационных центров кипения, достигающий нескольких порядков при увеличении температуры жидкости на 1° С. На основе опытов сделан вывод о том, что имеющиеся в жидкости при $T<0{,}9\,T_к$ готовые центры кипения не обеспечивают интенсивности парообразования, достаточной для существенного снижения расхода при течении вскипающей жидкости через короткие каналы [1].

Растворенные в жидкости газы могут быть центрами кипения. Однако при экспериментальном изучении достижимого перегрева газированных жидкостей обнаружено, что граница достижимого перегрева жидкости при растворении в ней газа определяется теорией гомогенного зародышеобразования и смещается в соответствии с изменением теплофизических свойств газированной жидкости [4–7]. Важно выяснить, в какой мере насыщение газом повлияет на течение вскипающей жидкости.