

УДК 536.4.42:669-154

## **ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКИХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ МАГНИЙ–СВИНЕЦ\***

**Р.А. ХАЙРУЛИН, А.С. КОШЕЛЕВА, С.В. СТАНКУС**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

Методом просвечивания образцов узким пучком гамма-излучения в интервале от температуры ликвидуса до 950–1000 К для составов 19,11, 33,45, 52,46 и 83,06 ат. % Pb измерены температурные изменения плотности сплавов системы магний–свинец в жидком состоянии. Показано, что в пределах оцениваемых погрешностей (0,25–0,30 %) плотность расплавов линейно зависит от температуры. Получены аппроксимационные зависимости  $\rho(T)$  для каждого исследованного состава, а также обобщающие зависимости плотности от температуры и концентрации для интервала 0–100 ат. % свинца.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Бинарная система магний–свинец обладает довольно сложной фазовой диаграммой, включающей интерметаллид состава  $Mg_2Pb$  и две эвтектические фазы, содержащие 19,1 ат. % и 83 ат. % Pb [1]. Эвтектика с большим содержанием свинца представляет интерес как перспективный жидкометаллический теплоноситель для ядерной энергетики. Точные данные о температурных и межфазных изменениях термических свойств всех составляющих систему фаз необходимы для оптимизации режимов работы атомных установок и прогнозирования возникновения аварийных ситуаций. Фазовая диаграмма системы магний–свинец изучена достаточно подробно [1], однако термические свойства расплавов практически не исследовались [2]. Цель настоящей работы состояла в детальном исследовании плотности и коэффициентов термического расширения (КТР) расплавов системы магний–свинец в широком интервале температур и концентраций.

### **1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

Измерения проводились методом просвечивания образцов узким пучком монохроматического гамма-излучения, подробно описанным в [2–5]. В качестве источника гамма-квантов использовался изотоп цезий-137, активностью около 50 ГБк. Экспериментальная установка П-3 [5] имеет рабочий интервал температур 293–1100 К и давлений 10 МПа–0,3 МПа (вакуум, аргон), потребляемая мощность не превышает 3 кВт.

Температура измерялась хромель–алюмелевыми термопарами, которые поверялись по точкам затвердевания чистых металлов. Измерительная ячейка состояла из танталового тигля с крышкой и танталовой гильзы для термопары погружения. Коэффициенты массового ослабления излучения компонентов, которые использовались

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-08-00040).

для расчета плотности [4], измерялись до высокотемпературных опытов. Перед экспериментом высокотемпературная печь вакуумировалась и заполнялась чистым аргоном (99,992 об. %) до давления 0,1 МПа. Плотность исходных металлов (содержание основного компонента выше 99,99 вес. %) определялась методом гидростатического взвешивания в толуоле марки “ХЧ для спектроскопии” с погрешностью менее 0,05 %.

Синтез образцов проводился непосредственно в экспериментах по определению плотности путем расплавления навесок магния и свинца, взятых в требуемом соотношении, и последующего тщательного перемешивания расплава механической мешалкой. Гомогенность жидких сплавов контролировалась по измерениям интенсивности прошедшего излучения при различных расстояниях оси пучка от дна тигля. Были изучены сплавы с содержанием свинца 19,11, 33,45, 52,46 и 83,06 ат. % Pb.

Исследования термических свойств расплавов велись в динамическом режиме при скоростях изменения температуры печи 1–5 К/мин. В отдельных точках плотность измерялась после длительной (до 30 мин) изотермической выдержки. В пределах погрешности измерений результаты стационарных и динамических опытов совпадали между собой.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, 2 и в табл. 1 приведены типичные результаты измерений термических свойств жидких сплавов системы магний–свинец. Плотность всех расплавов в исследованном интервале температур (точка ликвидус — 950 ÷ 1000 К) хорошо описывается линейной зависимостью:

$$\rho(T) = \rho_L - \rho_L \beta_L (T - T_L), \quad (1)$$

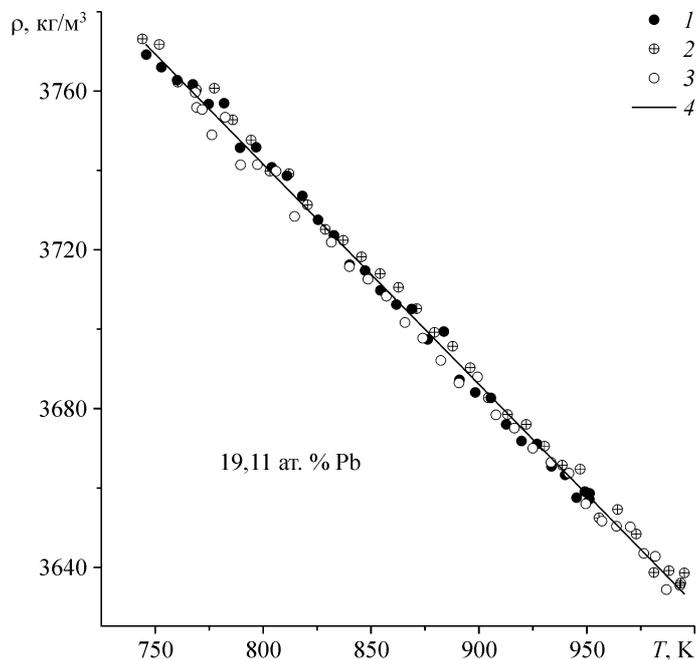


Рис. 1. Температурная зависимость плотности расплава высокотемпературной эвтектики  $\text{Pb}_{19,1}\text{Mg}_{81,9}$ .

1 — охлаждение, опыт (1), 2 — охлаждение, опыт (2), 3 — нагрев, опыт (2), 4 — аппроксимационная зависимость (1).

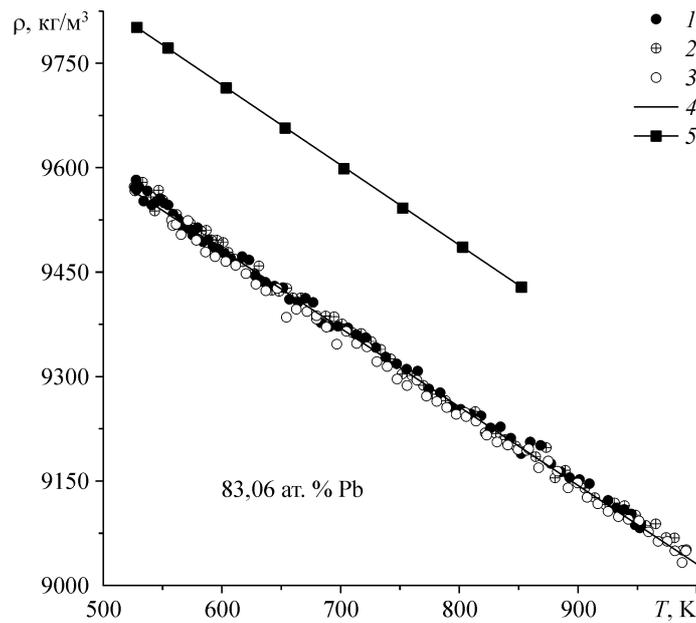


Рис. 2. Температурная зависимость плотности расплава низкотемпературной эвтектики  $Pb_{83}Mg_{17}$ .

1 — охлаждение, опыт (1), 2 — охлаждение, опыт (2), 3 — нагрев, опыт (2), 4 — аппроксимационная зависимость (1), 5 — данные [2].

где  $T_L$  — температура ликвидуса сплава,  $\rho_L$  и  $\beta_L$  — плотность и коэффициент термического расширения расплава в точке ликвидуса. Величины  $T_L$  определялись как по термограмме, так и по скачкообразному изменению регистрируемой интенсивности излучения при кристаллизации образцов. Для серии экспериментов с образцами одного состава  $T_L$  воспроизводились в пределах 1 К, а наблюдаемые переохлаждения расплавов составляли 1–2 К.

Как видно из табл. 1, величины плотности и коэффициентов теплового расширения, полученные в различных термических циклах, совпадали в пределах оцениваемых случайных погрешностей. Среднеквадратичные отклонения экспериментальных точек от аппроксимационных зависимостей (1) не превышали 0,07 % и лишь для состава 83,06 ат. % Pb — 0,10 %. В табл. 2 приведены средневзвешенные величины температур ликвидуса, плотности и коэффициентов термического расширения, а в табл. 3 представлены сглаженные зависимости термических свойств расплавов системы магний–свинец, рассчитанные по аппроксимационным уравнениям (1).

Таблица 1

Экспериментальные данные по плотности и КТР высокотемпературной эвтектики ( $X_{Pb} = 19,11$  ат. %)\*

Цикл	$\rho_L$ , кг/м <sup>3</sup>	$\beta_L \times 10^5$ , К <sup>-1</sup>
Охлаждение 1	3773,8±1,6	14,96±0,33
Охлаждение 2	3775,0±1,5	14,72±0,25
Нагрев 2	3769,0±3,8	14,47±0,32
Средневзвешенное значение	3773±10	14,7±0,6

\* — для экспериментальных величин указана случайная погрешность, для средневзвешенных — общая (доверительная вероятность 95 %).

**Таблица 2**

**Плотность и коэффициент теплового расширения сплавов системы магний–свинец при температуре в точке ликвидуса**

Состав, ат. % Pb	$T_L$ , К	$\rho_L$ , кг/м <sup>3</sup>	$\beta \times 10^5$ , К <sup>-1</sup>	$T_L$ , К [1]	Данные [2]		
					$\rho_L$ , кг/м <sup>3</sup>	$\beta \times 10^5$ , К <sup>-1</sup>	$T_L$ , К
19,11	742±3	3773±10	14,7±0,6	740,2	–	–	–
33,45	820±3	5256±15	14,6±0,8	823±1	–	–	–
52,46	727±3	7027±17	12,9±0,4	~ 730	–	–	–
83,06	524±3	9563±27	11,7±0,2	522,7	9807±34	11,7±0,6	522±5

Температуры ликвидуса хорошо согласуются со справочными данными [1]. Заметное расхождение результатов по плотности расплава низкотемпературной эвтектики Mg<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> нашей работы и работы [2], по-видимому, связано с наличием градиентов концентрации в образцах [2]. Они были обнаружены авторами экспериментально, но не были устранены. В то же время коэффициенты теплового расширения расплава Mg<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> совпадают между собой.

**Таблица 3**

**Термические свойства сплавов системы магний–свинец в жидком состоянии**

Состав, ат. % Pb	$T$ , К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\beta \times 10^5$ , К <sup>-1</sup>	Погрешность, %	
				$\rho$	$\beta$
19,11	742	3773	14,7	0,26	4,1
	750	3769	14,7	0,26	4,1
	800	3741	14,8	0,26	4,0
	850	3713	14,9	0,26	3,8
	900	3686	15,0	0,26	4,0
	950	3658	15,2	0,26	4,1
	1000	3630	15,3	0,26	4,3
33,45	820	5256	14,6	0,30	5,6
	850	5233	14,7	0,30	5,4
	900	5195	14,8	0,30	5,4
	950	5156	14,9	0,30	5,5
52,46	727	7027	12,9	0,25	3,1
	750	7006	12,9	0,25	3,0
	800	6961	13,0	0,25	2,9
	850	6915	13,0	0,25	2,8
	900	6870	13,1	0,25	2,9
	950	6825	13,2	0,25	3,0
	1000	6780	13,3	0,25	3,1
83,06	524	9563	11,7	0,28	1,8
	550	9534	11,7	0,28	1,8
	600	9478	11,8	0,28	1,7
	650	9422	11,9	0,28	1,7
	700	9366	11,9	0,28	1,6
	750	9310	12,0	0,28	1,6
	800	9254	12,1	0,28	1,6
	850	9198	12,2	0,28	1,7
	900	9142	12,2	0,28	1,7
	950	9086	12,3	0,28	1,8
	1000	9030	12,4	0,28	1,9

Таблица 4

Параметры  $A_i$  аппроксимационной зависимости (2)

Концентрационный интервал, ат. % Pb	$i$	$A_i$
0–33,45	0	1780,66
	1	130,1283
	2	-0,23507
	3	$3,7249 \times 10^{-4}$
	4	-0,24313
	5	-0,01713
	6	$4,4338 \times 10^{-5}$
33,45–100	0	1969,94
	1	134,9732
	2	-0,599195
	3	0,0019246
	4	-0,5521
	5	-0,006237
	6	$7,1763 \times 10^{-6}$

Для того, чтобы иметь возможность определить термические свойства сплавов при произвольной концентрации, экспериментальные данные по плотности, полученные в этой работе, совместно с данными для чистых магния [6] и свинца [7], были аппроксимированы следующей зависимостью:

$$\rho(T, X) = \sum_{i=0}^3 A_i X^i + T \sum_{i=4}^6 A_i X^{i-4}, \quad (2)$$

где  $T$  — температура в К,  $X_i$  — концентрация свинца в сплаве в ат. % Pb,  $A_i$  — подгоночные параметры. Обработка показала, что наилучшие результаты получаются при разбивке концентрационного интервала на два: 0–33,45 ат. % Pb и 33,45–100 ат. % Pb. Соответствующие этим интервалам коэффициенты  $A_i$  приведены в табл. 4. Плотности на пограничной кривой (33,45 ат. % Pb), рассчитанные по (2) для обоих наборов коэффициентов  $A_i$ , различаются на 0,001–0,006 % во всем интервале измерений. На рис. 3, 4 приведено сопоставление результатов расчетов

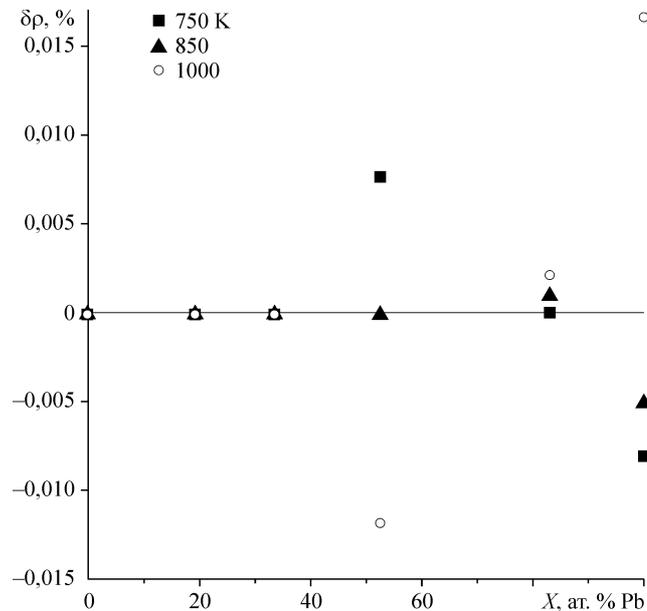


Рис. 3. Относительные отклонения значений плотности расплавов системы Mg–Pb, рассчитанных по уравнению (2), от данных из работ [6, 7] и аппроксимационных уравнений (1).

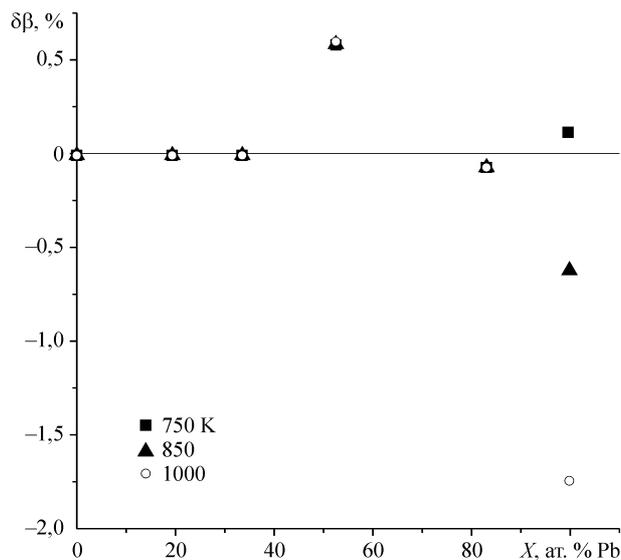


Рис. 4. Относительные отклонения значений коэффициентов теплового расширения расплавов системы Mg–Pb, рассчитанных по уравнению (2), от данных работ [6, 7] и аппроксимационных уравнений (1).

плотности и КТР расплавов системы магний–свинец по формулам (1) и (2). Видно, что полученные значения отличаются на величины существенно меньшие, чем погрешность экспериментальных данных. Это дает основание полагать, что термические свойства жидких сплавов системы Mg–Pb произвольной концентрации могут быть найдены по уравнениям (2) с ошибкой, отвечающей погрешности данных в табл. 2, 3.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые экспериментальные данные по плотности и коэффициентам термического расширения четырех жидких сплавов системы магний–свинец в интервале концентраций 19,11–83,06 ат. % Pb. Для составов 19,11; 33,45 и 52,46 ат. % Pb результаты получены впервые. Показано, что температурные зависимости плотности расплавов не имеют аномалий и являются линейными. Предложены аппроксимационные уравнения, позволяющие рассчитывать термические свойства жидких сплавов во всем интервале концентраций с погрешностью экспериментальных данных.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nayeb-Hashemi A.A. and Clark J.B. The Mg-Pb (Magnesium-Lead) system // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. — 1985. — Vol. 6, No.1 — P. 56–66.
2. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Тягельский П.В. Термические свойства и кристаллизация эвтектики в системе свинец–магний // Теплофизика и аэромеханика. — 2004. — Т. 11, № 1. — С. 153–159.
3. Станкус С.В., Хайрулин Р.А. Измерение термических свойств платины в интервале температур 293–2300 К методом проникающего излучения // Теплофизика высоких температур. — 1992. — Т. 30, № 3. — С. 487–494.
4. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Багинский А.В. Термодинамические и переносные свойства гексафторбензола и перфтортриэтиламина в жидком состоянии // Теплофизика и аэромеханика. — 2001. — Т. 8, № 2. — С. 317–327.
5. Станкус С. В., Хайрулин Р. А. Плотность сплавов системы олово–свинец в твердом и жидком состояниях // Теплофизика высоких температур. — 2006. — Т. 44, № 3. — С. 393–400.
6. Станкус С.В., Хайрулин Р.А. Температурные и межфазные изменения плотности магния в твердом и жидком состояниях // Цветные металлы. — 1990. — № 9. — С. 65–67.
7. Хайрулин Р.А., Станкус С.В. Термические свойства свинца и алюминия в твердом и жидком состояниях // Теплофизические свойства растворов, расплавов и композитов (Сб. науч. тр. / Ин-т теплофизики СО АН СССР). — Новосибирск, 1992. — С. 13–24.

*Статья поступила в редакцию 31 августа 2006 г.*