

УДК 536.221:550.835.23

Объемные свойства расплавов медь-алюминий при температурах до 1400 °С

А.Р. Курочкин¹, П.С. Попель², Д.А. Ягодин², А.В. Борисенко¹

¹Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС РФ, Екатеринбург

²Уральский государственный педагогический университет, Екатеринбург

E-mail: pspopel@mail.ru

Методом проникающего гамма-излучения измерена плотность расплавов медь-алюминий, содержащих от 0 до 100 % алюминия, в интервале температур от ликвидуса до 1300–1400 °С, рассчитаны концентрационные зависимости их молярного объема. Высокая точность измерений (погрешность не более 0,2 %) позволяет рекомендовать использование полученных данных в качестве справочных. Обнаружена существенная немонотонность изотерм молярного объема, свидетельствующая о сложности строения указанных расплавов, особенно в области составов, богатых алюминием. Приведены параметры полиномов, позволяющих описать концентрационные зависимости молярного объема с погрешностью, не превышающей 1 %.

Ключевые слова: расплавы медь-алюминий, плотность, гамма-метод, молярный объем.

Введение

Диаграмма состояния сплавов меди с алюминием весьма сложна [1, 2]. Наряду с довольно широкими областями существования твердых растворов (около 20 ат. % Al со стороны меди) и эвтектики, образованной алюминием и θ -фазой (32,2 ат. % Cu со стороны алюминия), на ней имеется чрезвычайно сложный центральный участок, на котором обнаружено существование различных интерметаллических соединений, в том числе и достаточно тугоплавких. Система Cu-Al интересна и тем, что среди ее сплавов найдены составы, склонные к образованию квазикристаллов с симметрией пятого порядка [3]. В области образования твердых растворов сплавы меди с алюминием образуют класс алюминиевых бронз, а в противоположной части диаграммы состояния находятся дуралюмины, которые так же, как и эти бронзы, находят широкое промышленное применение.

Известно, что свойства этих сплавов в существенной степени зависят от температур их выплавки [4]. Для понимания сути процессов, протекающих в жидкой фазе, необходима информация о свойствах соответствующих расплавов и об их изменениях при вариации температуры. Анализ литературных данных свидетельствует о том, что не все свойства исследованы достаточно тщательно. В частности, только в течение последних пяти лет появились первые публикации по плотности расплавов [5, 6]. В этих экспериментах использовались либо методики, не обладающие высокой точностью (как, например, метод большой капли в [5]), либо недостаточно апробированные и пока

не претендующие на роль прецизионных (метод левитирующей капли в [6]). Поэтому в настоящей работе проведено довольно подробное исследование концентрационных зависимостей плотности и молярного объема расплавов Cu-Al в интервалах температур от ликвидуса до 1300–1400 °С и составов от 0 до 100 % второго компонента методом проникающего гамма-излучения, точность которого значительно выше, чем у использованных в [5, 6].

1. Методика измерений

В методе измерения плотности ρ по поглощению гамма-излучения используется известный закон ослабления пучка гамма-квантов веществом:

$$I = BI_0 \exp(-\mu\rho l). \quad (1)$$

Здесь I_0 — интенсивность пучка, падающего на исследуемый образец, I — его интенсивность после прохождения образца толщиной l , μ — массовый коэффициент ослабления, зависящий от состава образца и энергии гамма-квантов, B — фактор накопления. Измерив I_0 , I , l и оценив величину B , можно, используя достаточно точно определенные величины μ компонентов сплава, рассчитать плотность образца.

Схема экспериментальной установки подробно обсуждалась в работе [7]. Здесь же приводились и способы учета многочисленных поправок, которые необходимо вводить в расчет плотности для корректного определения интенсивностей пучка I и I_0 и эффективной толщины поглотителя l . Они применялись в настоящей работе при оценке влияния мертвого времени счетного тракта, фонового излучения, эффектов наложения импульсов, кривизны образца и формы пучка.

Тигли из оксида бериллия, использовавшиеся в опытах, обладают, с одной стороны, чрезвычайно высокой термической и химической стойкостью, а с другой — практически идеально цилиндрической формой. Пучок гамма-квантов диаметром около 3 мм проходил на расстоянии около 10 мм от дна тигля при высоте образца 35–40 мм.

Для расчета плотности выбирались наиболее точные из имеющихся в литературе значений массового коэффициента ослабления μ (0,007263 м²/кг для меди и 0,007469 м²/кг для алюминия), приведенные в настоящей работе и соответствующие энергии используемых авторами настоящей работы гамма-квантов. Проведенный анализ [8] свидетельствует о том, что погрешность их определения не превышает 0,15 %. Значения μ сплавов рассчитывались по формуле

$$\mu = c\mu_{Al} + (1-c)\mu_{Cu}, \quad (2)$$

где c — массовая доля алюминия в сплаве. При тщательной корректировке всех экспериментально определяемых величин, входящих в формулу (1), погрешность измерения плотности расплавов не превышает 0,2 %.

Для приготовления образцов использовали алюминий А999 и медь электролитическую марки МООК. Навески этих металлов помещали в печь гамма-плотномера, рабочий объем вакуумировали до остаточного давления порядка 10⁻² Па, заполняли его высокочистым гелием марки А, затем медленно нагревали до температуры 1100 °С, вводили в расплавленный металл вольфрам-рениевую термопару ВР5-20 в чехле из того же ВеО, поднимали температуру до 1200 °С и выдерживали при этой температуре в течение 30 мин. В ходе изотермической выдержки образец несколько раз перемешивали термопарой. Затем ее извлекали из расплава и медленно охлаждали образец до комнатной температуры. После приготовления его перегружали в новый тигель, предварительно просвеченный пучком при комнатной температуре, помещали в печь плотномера, устанавливали термопару над образцом и нагревали его выше температуры ликвидус. Процесс

плавления образца фиксировали визуально через окно печи. Затем термopару погружали в расплав, медленно охлаждали рабочий объем до температуры ниже точки солидус и начинали измерять интенсивность проходящего пучка при нагреве и последующем охлаждении с указанной выше скоростью. Измерения плотности жидких меди и алюминия, которые проводились нами ранее в подобных условиях, не обнаружили существенных изменений массы образцов и содержания основных компонентов и примесей в этих металлах. После измерений плотности расплавов Cu-Al образцы свободно извлекались из тиглей, на их поверхностях не было заметно признаков взаимодействия с материалом тигля и атмосферой и их масса отличалась от первоначальной не более чем на 50 мг. Все это дает основания полагать, что состав этих образцов соответствовал задаваемому при их шихтовке.

2. Температурные зависимости плотности

Измерены температурные зависимости плотности $\rho(T)$ жидких алюминия и меди в ходе нагрева от точки плавления до 1370 и 1470 °C соответственно и последующего охлаждения. Авторы аппроксимировали эти кривые линейной функцией

$$\rho(T) = \rho_{\text{пл}} (1 - \alpha(T - T_{\text{пл}})), \quad (3)$$

где $\rho_{\text{пл}}$ — значение плотности при температуре плавления $T_{\text{пл}}$ (661 °C для алюминия и 1084 °C для меди, согласно [1]), $\alpha = \frac{1}{\rho_{\text{пл}}} \frac{d\rho}{dT}$ — температурный коэффициент плотности.

Результаты аппроксимации вместе с погрешностями определения $\rho_{\text{пл}}$ и α выражаются формулами:

– для жидкой меди

$$\rho = (7970 \pm 20) \left[1 - (9,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-5} (T - 1084) \right], \quad (4)$$

– для жидкого алюминия

$$\rho = (2373 \pm 3) \left[1 - (12,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-5} (T - 661) \right], \quad (5)$$

где плотность измеряется в $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а температура — в градусах Цельсия.

Полученные значения плотности жидких меди и алюминия не уступают по точности наиболее надежным данным других авторов [9–12], что дает уверенность в достоверности результатов, полученных в настоящей работе и для сплавов Cu-Al.

Температурные зависимости плотности, полученные в ходе охлаждения этих расплавов, с коэффициентами корреляции R , приведенными в табл. 1, могут быть аппроксимированы линейной функцией:

$$\rho(T) = \rho_L (1 - \alpha(T - T_L)), \quad (6)$$

где ρ_L — плотность при температуре ликвидуса T_L , $\alpha = \frac{1}{\rho_L} \frac{d\rho}{dT}$. Значения T_L взяты из

справочника [1]. Параметры линейной аппроксимации (6) для образцов с различной атомной концентрацией алюминия x_{Al} приведены в табл. 1.

3. Концентрационные зависимости плотности и молярного объема

В табл. 2 приведены значения плотности сплавов Cu-Al при фиксированных температурах, рассчитанные по данным табл. 1. Некоторые из этих изотерм, соответствующие 700, 900, 1100 и 1300 °C, построены на рис. 1 методом кубической сплайн-аппроксимации. Полученные результаты согласуются с погрешностью, близкой к 1,5 %, с данными,

Таблица 1

Результаты линейной аппроксимации (б) температурных зависимостей плотности расплавов Cu–Al

Концентрация алюминия x_{Al} , ат. %	T_L , °C	ρ_L , кг·м ⁻³	$\Delta\rho_L$, кг·м ⁻³	α , 10 ⁻⁵ °C ⁻¹	$\Delta\alpha$, 10 ⁻⁵ °C ⁻¹	R
0	1084	7970	20	9,0	0,2	0,961
5	1080	7809	10	9,6	0,1	0,994
10	1070	7324	10	9,7	0,1	0,995
18	1032	7010	10	10,3	0,1	0,995
25	1049	6700	10	11,9	0,1	0,996
30	1040	6220	10	11,4	0,1	0,994
34	1022	6010	10	12,1	0,1	0,995
40	960	5640	10	11,5	0,2	0,992
45	900	5420	7	10,8	0,1	0,992
50	850	5299	8	10,1	0,1	0,993
55	790	4938	5	10,0	0,1	0,994
60	700	4345	5	10,9	0,1	0,995
65	620	4238	4	10,80	0,08	0,997
67,8	591	3881	3	8,13	0,09	0,994
75	580	3691	3	8,4	0,1	0,994
82,9	550	3239	3	9,5	0,1	0,995
90	600	2966	3	9,7	0,1	0,991
95	640	2575	3	12,1	0,1	0,996
100	661	2374	3	12,4	0,1	0,986

указанными в работе [6]. Значения плотности, полученные в работе [5] методом большой капли, лежат систематически ниже значений, представленных в настоящей работе, примерно на 10 %, что ставит под сомнение приведенную в этой работе оценку погрешности (около 3 %). Принимая во внимание высокую точность гамма-метода измерения плотности, авторы полагают, что приведенные здесь результаты могут быть рекомендованы к использованию в качестве справочных данных.

Используя полученные значения плотности, для всех указанных в табл. 2 температур, по формуле $V_{\text{мол}} = M / \rho$, где M — молярная масса сплава, рассчитаны концентрационные зависимости молярного объема $V_{\text{мол}}$ расплавов Cu–Al. Результаты представлены в табл. 3. На рис. 2 приведены изотермы $V_{\text{мол}}$ для 700, 900, 1100 и 1300 °C. Видно, что эти кривые $V_{\text{мол}}(x_{Al})$ существенно немонотонны, особенно в области концентраций от 50 до 90 ат. %, причем разброс точек относительно любой сглаживающей кривой существенно превосходит погрешность измерения плотности, а значит, и молярного объема.

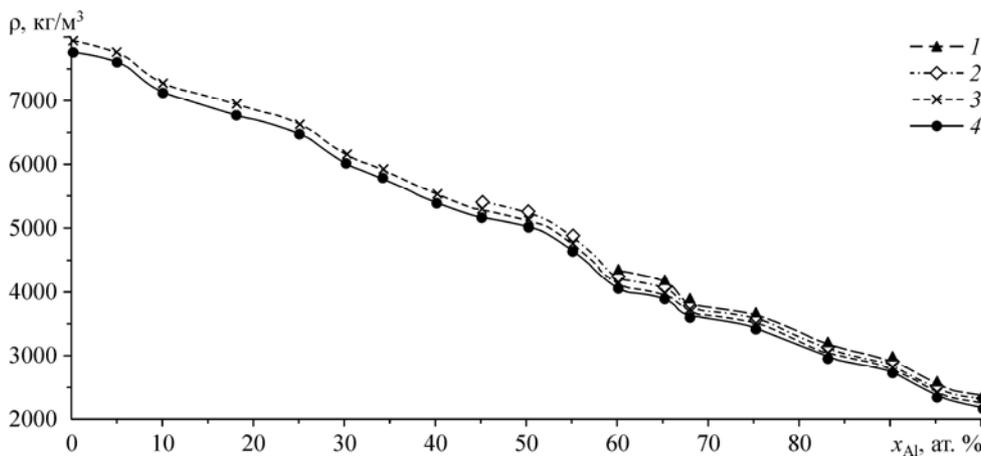


Рис. 1. Изотермы плотности расплавов Cu–Al при температурах 700(1), 900 (2), 1100 (3) и 1300 (4) °C.

Таблица 2

Значения плотности (кг/м^3) расплавов Cu–Al при фиксированных температурах по результатам линейной интерполяции (6) ее температурных зависимостей

x_{Al} , ат. % \ $T, ^\circ\text{C}$	700	750	800	850	900	950	1000	1050
0	–	–	–	–	–	–	–	–
5	–	–	–	–	–	–	–	–
10	–	–	–	–	–	–	–	–
18	–	–	–	–	–	–	–	7000
25	–	–	–	–	–	–	–	6699
30	–	–	–	–	–	–	–	6222
34	–	–	–	–	–	–	–	5993
40	–	–	–	–	–	–	5613	5581
45	–	–	–	–	5420	5391	5361	5332
50	–	–	–	5299	5272	5246	5219	5192
55	–	–	4933	4908	4884	4859	4834	4810
60	4345	4321	4297	4273	4250	4226	4202	4178
65	4201	4178	4156	4133	4110	4087	4064	4041
67,8	3847	3831	3815	3800	3784	3768	3752	3737
75	3654	3638	3623	3607	3592	3576	3561	3545
82,9	3193	3178	3162	3147	3131	3116	3101	3085
90	2937	2923	2909	2894	2880	2866	2852	2837
95	2557	2541	2526	2510	2494	2479	2463	2448
100	2362	2347	2332	2318	2303	2288	2274	2259

x_{Al} , ат. % \ $T, ^\circ\text{C}$	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400
0	7959	7923	7888	7852	7816	7780	7745
5	7794	7756	7719	7681	7643	7606	7568
10	7303	7267	7232	7196	7161	7125	7090
18	6964	6928	6892	6856	6820	6784	6747
25	6659	6619	6579	6539	6499	6459	6420
30	6186	6151	6115	6080	6045	6009	5974
34	5956	5920	5884	5847	5811	5774	5738
40	5548	5516	5483	5451	5418	5386	5353
45	5303	5274	5245	5216	5186	5157	5128
50	5165	5139	5112	5085	5059	5032	5005
55	4785	4761	4736	4711	4687	4662	4638
60	4155	4131	4107	4083	4059	4036	4012
65	4018	3995	3972	3949	3927	3904	3881
67,8	3721	3705	3689	3673	3658	3642	3626
75	3529	3514	3498	3483	3467	3452	3436
82,9	3070	3054	3039	3024	3008	2993	2977
90	2823	2809	2794	2780	2766	2751	2737
95	2432	2417	2401	2386	2370	2354	2339
100	2244	2229	2215	2200	2185	2170	2156

Таблица 3

Значения молярного объема $V_{\text{мол}}$ (10^{-6} м³/моль) расплавов Cu–Al при фиксированных температурах

$T, ^\circ\text{C}$ x_{Al} ат. %	700	750	800	850	900	950	1000	1050
0	–	–	–	–	–	–	–	–
5	–	–	–	–	–	–	–	–
10	–	–	–	–	–	–	–	–
18	–	–	–	–	–	–	–	8,137
25	–	–	–	–	–	–	–	8,122
30	–	–	–	–	–	–	–	8,451
34	–	–	–	–	–	–	–	8,529
40	–	–	–	–	–	–	8,715	8,766
45	–	–	–	–	8,689	8,736	8,783	8,831
50	–	–	–	8,542	8,585	8,629	8,673	8,718
55	–	–	8,805	8,849	8,894	8,939	8,985	9,031
60	9,577	9,629	9,683	9,736	9,791	9,846	9,902	9,958
65	9,468	9,520	9,573	9,626	9,679	9,733	9,788	9,844
67,8	10,074	10,116	10,158	10,200	10,242	10,285	10,328	10,372
75	9,887	9,929	9,972	10,014	10,058	10,101	10,145	10,190
82,9	10,409	10,459	10,510	10,561	10,613	10,666	10,719	10,772
90	10,430	10,481	10,533	10,585	10,638	10,691	10,744	10,799
95	11,268	11,337	11,407	11,478	11,549	11,622	11,695	11,770
100	11,422	11,494	11,567	11,640	11,715	11,791	11,867	11,945

$T, ^\circ\text{C}$ x_{Al} ат. %	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400
0	7,984	8,020	8,057	8,093	8,130	8,167	8,205
5	7,919	7,957	7,996	8,035	8,075	8,115	8,155
10	8,201	8,241	8,281	8,322	8,363	8,405	8,447
18	8,180	8,222	8,265	8,309	8,353	8,397	8,442
25	8,170	8,220	8,269	8,320	8,371	8,423	8,475
30	8,499	8,548	8,597	8,648	8,698	8,750	8,801
34	8,581	8,634	8,688	8,742	8,797	8,852	8,908
40	8,818	8,869	8,922	8,975	9,029	9,083	9,139
45	8,880	8,929	8,979	9,029	9,080	9,131	9,183
50	8,763	8,808	8,854	8,901	8,948	8,995	9,044
55	9,077	9,124	9,171	9,219	9,268	9,316	9,366
60	10,015	10,073	10,131	10,190	10,250	10,310	10,371
65	9,900	9,957	10,014	10,072	10,131	10,190	10,250
67,8	10,416	10,460	10,505	10,550	10,596	10,642	10,688
75	10,235	10,280	10,325	10,371	10,418	10,465	10,512
82,9	10,826	10,881	10,936	10,991	11,048	11,104	11,162
90	10,854	10,909	10,965	11,021	11,078	11,136	11,194
95	11,845	11,921	11,998	12,077	12,156	12,236	12,318
100	12,023	12,103	12,183	12,265	12,348	12,432	12,517

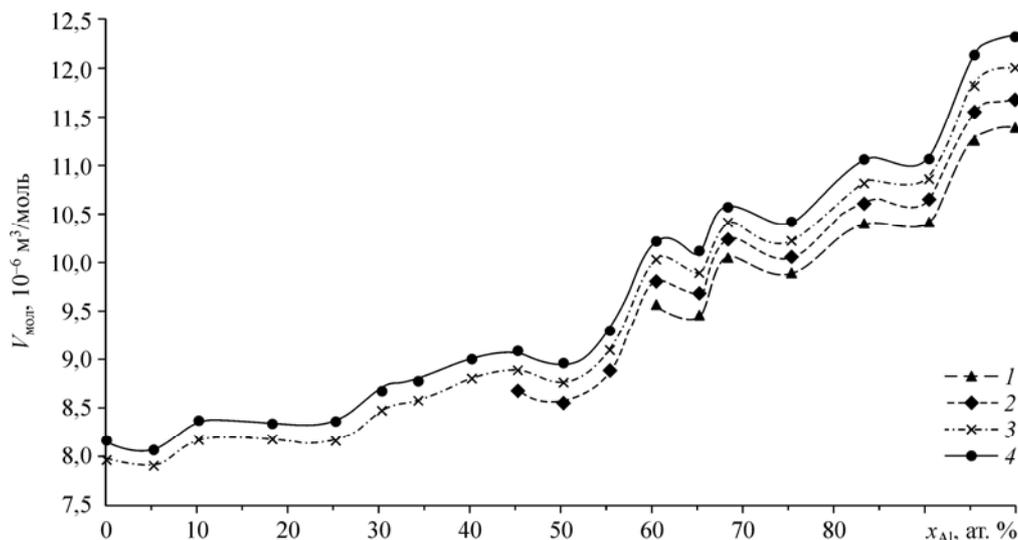


Рис. 2. Изотермы молярного объема расплавов Cu-Al при температурах 700 (1), 900 (2), 1100 (3) и 1300 (4) °С.

По результатам построения изотерм молярного объема $V_{\text{мол}}(x_{\text{Al}})$, приведенным на рис. 2, с использованием формул

$$\bar{V}_{\text{Al}} = V(x_{\text{Al}}) - x_{\text{Al}} \frac{dV(x_{\text{Al}})}{dx_{\text{Al}}}, \quad (7)$$

$$\bar{V}_{\text{Cu}} = V(x_{\text{Al}}) - (x_{\text{Al}} - 1) \frac{dV(x_{\text{Al}})}{dx_{\text{Al}}} \quad (8)$$

рассчитаны значения парциальных объемов компонентов \bar{V}_{Al} и \bar{V}_{Cu} и на рис. 3, *a-d* построены их концентрационные зависимости при тех же температурах.

4. Анализ полученных результатов

Полученные в настоящем исследовании изотермы молярного объема расплавов Cu-Al (рис. 2) определенно свидетельствуют о существенных отрицательных отклонениях этой величины от аддитивной зависимости, свойственной идеальным растворам. Эти отклонения начинают нарастать приблизительно вблизи 15 ат. % Al, т. е. при переходе к области составов, где наблюдаются многочисленные структурные превращения в твердом состоянии, связанные с формированием и распадом интерметаллических соединений [1]. Максимальное расхождение изотермы объема с аддитивной прямой наблюдаются вблизи эквиатомного состава, которому на диаграмме состояний соответствует образование η_1 -фазы. Второе, менее ярко выраженное отрицательное отклонение от аддитивности достигает максимума вблизи состава, соответствующего θ -фазе (67,8 ат. % Al). Кроме того, экстремумы подобных отклонений зафиксированы вблизи 75 и 90 ат. % Al, т. е. при составах, никак не выделенных на диаграмме состояний. Трактруя эти результаты в духе традиционного физико-химического анализа Курнакова [13], можно заключить, что расплавам Cu-Al свойственно преобладание взаимодействия разноименных атомов над одноименными. Это согласуется с образованием интерметаллических соединений при составах, близких к эквиатомному и к составу θ -фазы. Экстремумы отклонений

вблизи 75 и 90 ат. % Al могут быть связаны с появлением при этих составах одного или двух инородных атомов в первой координационной сфере атома алюминия. В работе [14] показано, что при таких составах возможны экстремумы плотности электронных состояний на уровне Ферми, возникновение которых сопровождается аномалиями на изотермах различных свойств жидких и твердых растворов.

К трактовке многочисленных экстремумов на изотермах парциальных молярных объемов компонентов, приведенных на рис. 3, следует относиться с осторожностью, поскольку большинство из них построено только по одной экспериментальной точке. Однако отклонения изотерм молярных объемов от монотонных зависимостей существенно превышают погрешность определения этой величины, поэтому игнорировать их нет оснований. Очевидно, для строгой интерпретации указанных аномалий необходимы дополнительные эксперименты с меньшим шагом по концентрации, которые планируется провести в ближайшем будущем.

В настоящее время для приближенных расчетов авторы рекомендуют использовать сглаженные изотермы молярного объема, полученные путем аппроксимации экспериментальных результатов полиномами 2-й степени:

$$V_{\text{мол}} = ax_{\text{Al}}^2 + bx_{\text{Al}} + c. \quad (9)$$

Повышение степени полиномов n вначале не приводит к увеличению коэффициента их корреляции с экспериментальными результатами, а затем, начиная с $n = 4$, сопровождается появлением дополнительных экстремумов, качественно изменяющих характер этих кривых. Параметры квадратических полиномов для различных температур приведены в табл. 4, а соответствующие им изотермы молярных объемов для тех же 700, 900, 1100 и 1300 °С — на рис. 4. Погрешности такой аппроксимации не превышают 1 %.

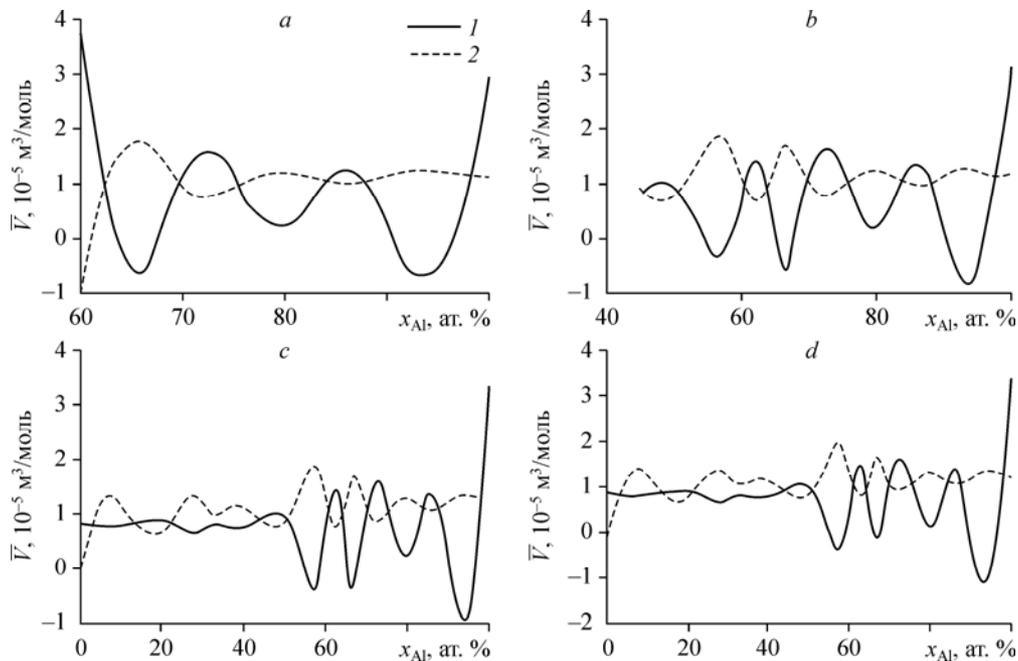


Рис. 3. Изотермы парциальных молярных объемов меди (1) и алюминия (2) в расплавах Cu-Al при температурах 700 (a), 900 (b), 1100 (c) и 1300°С (d).

Таблица 4

Параметры квадратических полиномов $V_{\text{мол}} = ax_{\text{Al}}^2 + bx_{\text{Al}} + c$, м³/моль
для различных температур

T , °C	a , 10^{-10}	b , 10^{-8}	c , 10^{-6}	R
700	8,629	9,199	12,013	0,918
900	-0,316	5,968	5,949	0,935
1100	3,357	0,696	7,946	0,969
1300	3,465	0,703	8,114	0,968

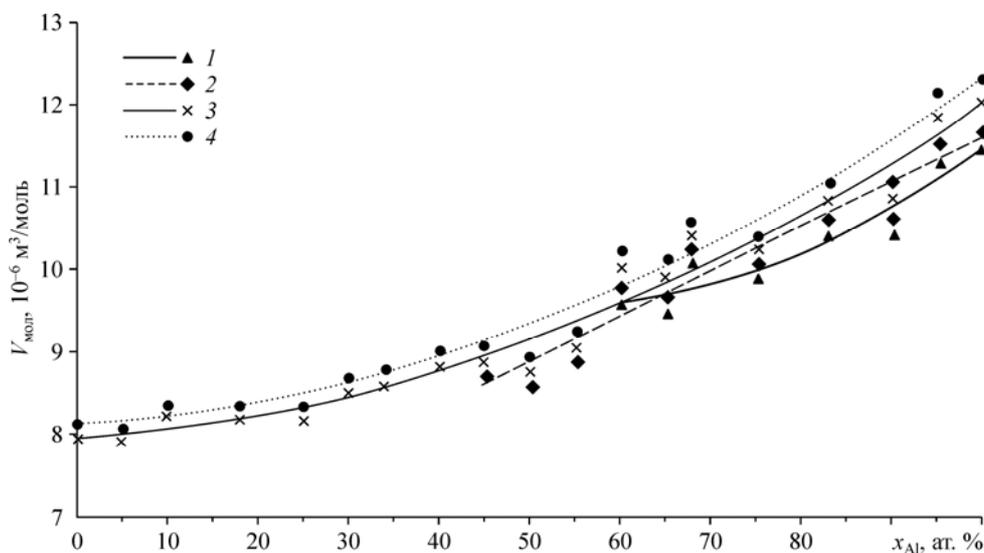


Рис. 4. Результаты аппроксимации изотерм молярного объема квадратичными полиномами (9) при температурах 700 (1), 900 (2), 1100 (3), 1300 (4) °C.

Заключение

Таким образом, в настоящем исследовании методом проникающего гамма-излучения экспериментально определена плотность расплавов медь-алюминий, содержащих от 0 до 100 % алюминия в интервале температур от ликвидуса до 1300–1400 °C, и рассчитаны концентрационные зависимости их молярного объема. Высокая точность измерений (с погрешностью не более 0,2 %) позволяет рекомендовать использование полученных данных в качестве справочных. Обнаружена существенная немонотонность изотерм молярного объема, свидетельствующая о сложности строения указанных расплавов, особенно в области составов, богатых алюминием. Приведены параметры полиномов, позволяющих описать концентрационные зависимости молярного объема с погрешностью, не превышающей 1 %.

Список литературы

1. **Диаграммы** состояния двойных металлических систем: справочник в 3 т. / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. Т. 1. 992 с.
2. **Мондольфо Л.Ф.** Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Metallurgia, 1979. 640 с.
3. **Zaitsev A.I., Zaitseva N.E., Shimko R.Yu., Arutyunyan A., Dunaev S.F., Kraposhin V.S., Lam Ha Thanh.** Thermodynamic properties of Al-Mn, Al-Cu and Al-Fe-Cu melts and their relation to liquid and quasicrystal structure // J. of Physics: Condensed Matter. 2008. Vol. 20, No. 11. P. 114121–114124.
4. **Константинова Н.Ю., Попель П.С., Ягодин Д.А.** Кинематическая вязкость жидких сплавов медь-алюминий // ТВТ, 2009. Т. 47, № 3. С. 1–6.

5. Plevachuk Y., Sklyarchuk V., Yakymovych A., Eckert S., Willers B., Eigenfeld K. Density, viscosity and electrical conductivity of hypoeutectic Al-Cu liquid alloys // Metallurgical and materials transactions. 2008. Vol. 39a. P. 3040–3045.
6. Brillo J., Egrý I., Westphal J. Density and thermal expansion of liquid binary Al-Ag and Al-Cu alloys // Int. J. Mat. Res. 2008. Vol. 99. P. 162–167.
7. Сивков Г.М., Ягодин Д.А., Попель П.С. Объемные характеристики сплавов Pd-Si при температурах от комнатной до 1600 °С // ТВТ. 2006. Т. 44, № 4. С. 539–545.
8. Макеев В.В., Дёмина Е.Л., Попель П.С., Архангельский Е.Л. Исследование плотности металлов методом проникающего гамма-излучения в интервале температур 290–2100 К // ТВТ. 1989. Т. 27, № 5. С. 889–895.
9. Смитлз К.Дж. Металлы. Справочник. М.: Металлургия, 1980. 448 с.
10. Ягодин Д.А. Исследование структурной неоднородности расплавов Ga-Bi и Pb-Si методами акустометрии и гамма-денситометрии. Дис. ... канд. физ.-мат. наук 01.04.14: защищена 29.05.07. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. 157 с.
11. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справ. изд. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
12. Яценко С.П., Кононенко В.И., Сухман А.Л. Экспериментальные исследования температурной зависимости поверхностного натяжения и плотности олова, индия, алюминия и галлия // ТВТ. 1972. Т. 10, № 6. С. 66–70.
13. Курнаков Н.С. Избранные труды. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 595 с.
14. Kim D.J. Ferromagnetism of transition metals alloys // Phys. Rev. B.: Condens. Matter. 1970. Vol. 1, No. 9. P. 3725–3740.

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2012 г.