

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

E. S. Levin, G. D. Ayushina, P. V. Geld, Политермы плотности и поверхностной энергии жидкого алюминия,  
*TVT*, 1968, Volume 6, Issue 3, 432–435

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt5515>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.174

May 13, 2025, 13:49:11



УДК 532.14+.61

## ПОЛИТЕРМЫ ПЛОТНОСТИ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ЖИДКОГО АЛЮМИНИЯ

*Е. С. Левин, Г. Д. Аюшина, П. В. Гельд*

В настоящей работе сделана попытка уточнения ранее предложенных [1—8] температурных зависимостей плотности и поверхностной энергии жидкого алюминия в широком интервале температур.

**Методика исследования.** В работе использовались образцы алюминия трех марок: № 1 — АВ-000 (99,99% Al, 0,003% Fe, 0,005% Cu и 0,002% Si); № 2 — АВ-0000 (99,996% Al, 0,0015% Fe и 0,0015% Si); а также № 3 — особо чистый металл английской фирмы «Матей Джонсон» (0,00003% Ca, 0,000015% Mg, 0,000015% Zn, 0,00001% Cu и 0,000004% Fe).

Плотность жидкого металла определялась методом «большой капли». При этом использовалась герметичная установка с бифилярным графитовым нагревателем. Температура расплавленного алюминия измерялась при помощи вольфрам-ренийевой термопары ВР 5/20, предварительно градуированной в Свердловском филиале Института метрологии (ВНИИМ). Горячий ее спай находился непосредственно вблизи капли, а холодный — термостатировался в сосуде Дьюара с тающим льдом. Опыты проводились в вакууме или атмосфере спектрально чистого гелия, последнее звено очистки которого включало две ловушки с активированным углем, охлаждаемым жидким азотом. Дополнительно для поглощения кислородсодержащих газов и азота использовался геттер из губчатого титана. Эти мероприятия обеспечили получение капель жидкого металла с достаточно чистой поверхностью.

После расплавления алюминия и десятиминутных изотермических выдержек (при каждой изучаемой температуре) капли фотографировались (увеличение в 8,35 раза) на сверхконтрастные штриховые диапозитивные пластинки.

Расчеты плотностей и поверхностных энергий осуществлялись по способу, предложенному Д. В. Хангадзе [9], с использованием таблиц, приведенных в работе [10]. Погрешности определения плотности составили  $\pm 1\%$ , а поверхностной энергии  $\pm 3\%$ .

**Результаты измерений и их обсуждение.** Плотность. Экспериментальные данные о зависимости плотности расплавленного алюминия от температуры представлены на рис. 1. На нем же приведены результаты измерений других авторов [1, 2, 4, 5] и значения, рекомендуемые в справочной литературе [11, 12].

Из рис. 1 прежде всего следует, что жидкий алюминий обладает отрицательным температурным коэффициентом плотности, характерным для расплавленных металлов с достаточно высоким координационным числом.

Нами не обнаружено каких-либо существенных различий в плотностях жидкого алюминия разных марок (при одинаковых температурах). Поэтому на рис. 1 экспериментальные данные, полученные при использовании образцов металла различной чистоты, отобраны одинаковыми точками.

Сопоставление результатов настоящего исследования с литературными данными указывает на близость установленных температурных зависимостей. Однако численные значения плотностей не всегда достаточно хорошо согласуются друг с другом. Так при 1100—1500°С результаты настоящей работы оказываются на ~1% более высокими, чем найденные Е. И. Гольцовой [1], но на 1,0—1,5% меньшими, чем в работе В. Н. Еременко и соавторов [5]. Напротив, приводимое в монографии Эллиота [2] значение  $\rho = 2,17 \text{ г/см}^3$  для 1330°С весьма хорошо согласуется с полученными данными. Столь же хорошее соответствие наблюдается с данными [2, 4] вблизи точки плавления алюминия.

Как видно из данных, обобщенных на рис. 1, плотность жидкого алюминия меняется с температурой по сложному закону. Однако результаты многих авторов, относящиеся к не слишком широкому температурным интервалам, могут быть в первом приближении

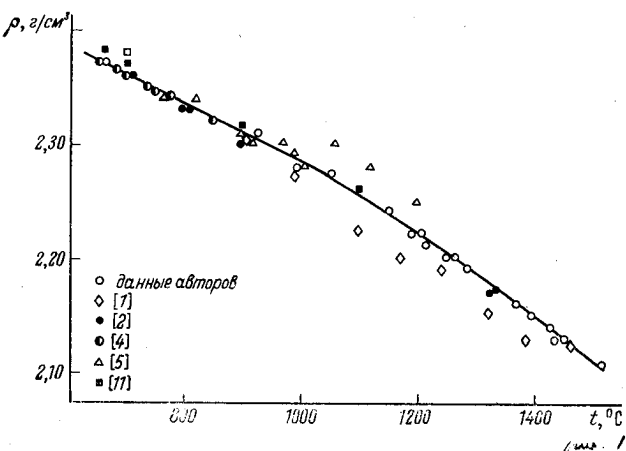


Рис. 1. Температурные зависимости плотности

аппроксимированы линейными зависимостями с угловыми коэффициентами, достаточно быстро растущими (по абсолютной величине) с увеличением температуры. Как показала настоящая работа, эти величины меняются от  $-2,6 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3\text{град}$  при 800°С до  $-4,0 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3\text{град}$  при 1500°С.

Ниже приведены значения температурных коэффициентов плотности жидкого алюминия ( $\alpha$ ) и интервалы температур, в которых они определялись разными авторами. Обращает на себя внимание возрастание значения  $\alpha$  по модулю с ростом температурного интервала исследований (или увеличением температур измерений).

Наименьший по абсолютной величине температурный коэффициент плотности расплавленного алюминия, равный  $-2,5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3\text{град}$ , был установлен в интервале температур между 760 и 1200°С в работе [5]. Несколько большие значения ( $-2,65 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3\text{град}$ ) вытекают из результатов измерений [4] при 660—850°С. По справочным данным [11], температурный коэффициент плотности жидкого алюминия в интервале температур 660—1100°С составляет около  $-2,6 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3\text{град}$ . Данные [2] хорошо описываются уравнениями прямых, тангенс угла наклона которых к оси температур близок к  $-3,0 \cdot 10^{-4}$ . Еще большие значения температурных коэффициентов вытекают из результатов [1], хорошо описываемые выражением

$$\rho = 2,369 - 3,11 \cdot 10^{-4}(t - 659), \quad (1)$$

где  $t$  — температура, °С. Следует заметить, что это уравнение, основанное на данных о плотности алюминия между 1000 и 1450°С, было обобщено автором на все температуры, превышающие точку плавления.

**Поверхностная энергия.** Литературные данные о поверхностной энергии жидкого алюминия довольно многочисленны, но противоречивы [2, 3, 5—8, 13, 14]. В справочной литературе также приводятся сильно различающиеся ее значения [11, 15, 16]. Это, в частности, видно из рис. 2, на котором обобщены результаты измерений  $\sigma$ , выполненные разными авторами, а также полученные в настоящей работе.

Хотелось бы отметить, что особенно большой разброс данных о поверхностной энергии жидкого алюминия имеется в работах, выполненных до пятидесятих годов (при температуре плавления  $\sigma$  колеблется от 400 до 1128  $\text{мдж}/\text{м}^2$ ), обзор которых выполнен в [6]. Сильно заниженные значения поверхностного натяжения, по-видимому, были получены в результате использования недостаточно чистого металла и несовершенства методик (не обеспечивавших сохранение чистоты поверхности расплава). Действительно, проведенные нами эксперименты со специально загрязненным металлом (путем его переплавки на воздухе) привели к существенно пониженным значениям поверхностной энергии (эти результаты на рис. 2 выделены пунктирным овалом). Результаты настоящей работы

достаточно хорошо согласуются с данными других авторов, полученными в последние годы, и могут быть приближенно описаны линейным уравнением

$$\sigma = 965 - 0,15t, \quad (2)$$

где  $t$  — в  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma$  — в  $\text{мдж}/\text{м}^2$ . Они подтверждают справедливость предложенной в [5] температурной зависимости

$$\sigma = 865 - 0,14(t - 660). \quad (3)$$

Однако установленная в работе Л. Кубичека [7] зависимость

$$\sigma = 863 - 0,33(t - 660) \quad (4)$$

приводит к заниженным результатам, особенно при высоких температурах. Это связано с неоправданно большим значением температурного коэффициента поверхностного натяжения алюминия ( $-0,33 \text{ мдж}/\text{м}^2\text{град}$ ), близким к полученному ранее Пельцелем [3] ( $-0,35 \text{ мдж}/\text{м}^2\text{град}$ ). Другой крайностью являются результаты работы [13]:

$$\sigma = 825 - 0,05(T - 933), \quad (5)$$

в которой обнаружена слишком слабая температурная зависимость поверхностного натяжения.

Полученный в настоящей работе температурный коэффициент поверхностного натяжения жидкого алюминия ( $-0,15 \text{ мдж}/\text{м}^2\text{град}$ ) хорошо согласуется с ранее установленным в исследовании [5] ( $-0,14 \text{ мдж}/\text{м}^2\text{град}$ ) и результатами теоретических расчетов, выполненных С. Н. Задумкиным ( $-0,13 \text{ мдж}/\text{м}^2\text{град}$ ) [17]. По-видимому, эти значения  $d\sigma/dt$  наиболее правдоподобны.

Уральский политехнический институт

Поступила в редакцию  
15 V 1967

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. И. Гольцова. Теплофизика высоких температур, 3, 483, 1965.
2. J. E. Elliott, M. Gleiser. Thermochemistry for smelting. London, 1960.
3. E. Pelzel. Berg- u. Hüttenmann Monatsch, Montan Hochschule, Leoben. 93, 248, 1948; 94, 10, 1949.
4. В. М. Глазов, Ю. Д. Чистяков. Изв. АН СССР. ОТН, № 7, 141, 1958.
5. В. Н. Еременко, В. И. Ниженко, Ю. В. Найдич. Изв. АН СССР. ОТН, Металлургия и топливо, № 3, 150, 1961.
6. А. М. Корольков. Изв. АН СССР. ОТН, № 2, 35, 1956.
7. Л. Кубичек. Изв. АН СССР. ОТН, Металлургия и топливо, № 2, 96, 1959.

8. В. Н. Еременко, Ю. Н. Иващенко, В. И. Ниженко, В. В. Фесенко. Изв. АН СССР. ОТН, № 7, 144, 1958.
9. Д. В. Хантадзе. Физ. металлов и металловедение, 15, 470, 1963.
10. А. Ю. Кошевник, М. М. Кусаков, Н. М. Лубман. Ж. физ. химии, 27, 1887, 1953.
11. Справочник машиностроителя, 2. Машгиз, 1963, стр. 44.
12. Справочник машиностроителя, 6. Машгиз, 1963, стр. 374.
13. V. Davies, I. M. West. J. Inst. Metals, 92, 208, 1964.
14. O. Flint. J. Nucl. Mater, 16, 233, 1965.
15. Handbook of Chemistry and Physics, 1953—1954.
16. Справочник химика, 1. Гостехиздат, 1954.
17. С. Н. Задумкин. Сб. Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. Нальчик, 1965, стр. 12.