

УДК 532.64:546.311

ПОЛИТЕРМЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ МЕДЬ–АЛЮМИНИЙ

© 2021 г. Б. С. Карамурзов^а, Р. А. Кутуев^б, М. Х. Понежев^а, В. А. Созаев^{с, *},
А. Х. Шерметов^а, А. А. Шокаров^а

^аКабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, 360004 Россия

^бЧеченский государственный университет, Грозный, 364907 Россия

^сСеверо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ), Владикавказ, 362021 Россия

*e-mail: sozaeff@mail.ru

Поступила в редакцию 04.06.2020 г.

После доработки 22.08.2020 г.

Принята к публикации 30.08.2020 г.

Методом лежащей капли изучены политермы плотности, поверхностного натяжения расплавов системы Cu–Al и углов смачивания подложек из Ni–Cr, Co–Cr, нержавеющей стали 25X18H9C2 и титана. Обработку контура капли проводили с использованием современных информационных технологий, в частности с помощью программного комплекса ImageJ. Получены уравнения политерм плотности и поверхностного натяжения расплавов системы Cu–Al. Показано, что расплавы Cu–Al смачивают подложки при 1000 К и более. Выявлены особенности температурных зависимостей углов смачивания.

Ключевые слова: политермы плотности, поверхностное натяжение, углы смачивания.

DOI: 10.31857/S1028096021030055

ВВЕДЕНИЕ

Сплавы алюминий–медь (дюралюминий, алюминиевые бронзы) широко применяются в промышленности при изготовлении емкостей для жидкого кислорода и водорода, в авиапромышленности для изготовления некоторых деталей турбореактивных двигателей и в электротехнике [1]. В литературе имеется достаточно много сведений о теплофизических свойствах системы Cu–Al, однако многие из этих данных не согласуются друг с другом [1–9]. Данные о поверхностных свойствах расплавов Cu–Al необходимы при разработке высокотемпературных припоев для пайки титана, нержавеющей сталей, твердых сплавов [2, 3].

Поверхностное натяжение и свойства сплавов Cu–Al зависят от предварительной термовакуумной обработки, типа материала (чашечки или капилляра), контактирующего с жидким расплавом, типа примесей в алюминии, наличия кислорода в газовой среде, соприкасающейся с расплавом. Обычно измерение поверхностного натяжения проводят методом максимального давления в газовом пузырьке или методом лежащей капли. При погружении капилляра в расплавы с высоким напряжением внешней поверхности, но малой плотностью, к которым относятся алюминиевые

сплавы, возможны неконтролируемые ошибки измерений, обусловленные изменением высоты уровня вследствие образования пузырьков и изменением искривления внешней поверхности расплава. Поэтому более предпочтительны методы лежащей и большой капли [3]. Предпринимаются также разработки новых методов измерения плотности расплавов [7, 10, 11]: метод проникающего гамма-излучения [7], а также метод высокотемпературной денситометрии, метод левитирующей капли [12], способ определения поверхностного натяжения жидкости, находящейся во взвешенном состоянии [13].

Плотность и поверхностное натяжение лежащей капли обычно измеряют традиционными методами обмера капли. Однако в последнее время при обработке контура капли начали использовать современные информационные технологии [14, 15], которые применяются в настоящей работе.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные данные были получены с использованием высокотемпературной вакуумной установки (вакуум 10^{-2} Па) с водоохлаждаемым корпусом из нержавеющей стали методом большой капли в атмосфере гелия марки А. Фотографии профиля исследуемой капли были полу-

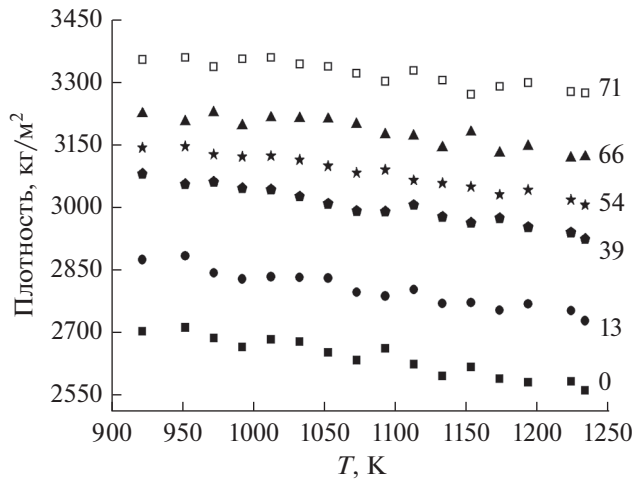


Рис. 1. Политермы плотности расплавов алюминий–медь с различной атомной концентрацией меди (указана возле каждой кривой).

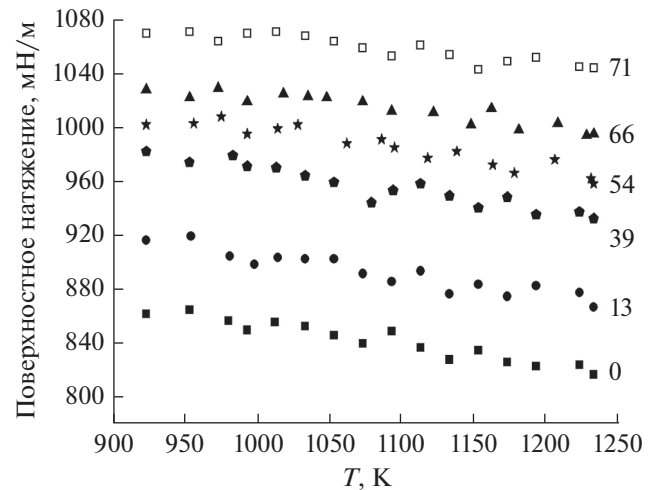


Рис. 2. Политермы поверхностного натяжения расплавов алюминий–медь с различной атомной концентрацией меди (указана возле каждой кривой).

чены с помощью цифрового фотоаппарата. Контур капли обрабатывали с помощью программного комплекса ImageJ, базирующегося на численном интегрировании уравнения Юнга–Лапласа [14], который состоит из трех блоков: блок, связанный с введением в ПЭВМ изображения капли расплава; вычислительный блок; блок проведения оценок. Погрешность измерения угла смачивания 1%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Политермы плотности показаны на рис. 1. Плотность расплава Al–Cu всех представленных концентраций линейно уменьшается с температурой. С повышением концентрации меди плотность повышается. Результаты хорошо согласуются с имеющимися литературными данными. Количественно они лежат выше данных [16], а также данных, полученных методом лежащей капли, и данных [7], приведенных в виде уравнения:

$$\rho = 2373[1 - 12.4 \times 10^{-5}(T - 661^\circ\text{C})],$$

Таблица 1. Линейные уравнения плотности (ρ) и поверхностного натяжения (σ) расплавов системы Al–Cu

Расплав	ρ , кг/м ³	σ , мН/м
Чистый Al	$3138.2 - 0.46T$	$1001.2 - 0.14T$
Al–Cu(71 ат. %)	$3641.7 - 0.3T$	$1160.7 - 0.1T$
Al–Cu(66 ат. %)	$3562.9 - 0.35T$	$1135.8 - 0.11T$
Al–Cu(54 ат. %)	$3577.9 - 0.46T$	$1149.1 - 0.15T$
Al–Cu(39 ат. %)	$3510.3 - 0.47T$	$1126.9 - 0.16T$
Al–Cu(13 ат. %)	$3288.7T$	$1051 - 0.15T$

где $\rho = 2373$ кг/м³, при температуре плавления 661°C температурный коэффициент плотности $\alpha = 12.4 \times 10^{-5}$.

На рис. 2 представлены политермы поверхностного натяжения, из которых видно, что с увеличением добавки меди поверхностное натяжение сплава растет, что хорошо согласуется с литературными данными. Все политермы имеют отрицательный температурный коэффициент, погрешность измерения составила 2%.

Данные об алюминии согласуются с политермой поверхностного натяжения в [4], где для чистого алюминия получено уравнение:

$$\sigma = 949 - 0.134T.$$

В табл. 1 приведены уравнения политерм плотности и поверхностного натяжения системы Al–Cu разных концентраций, найденные методом наименьших квадратов.

Политермы углов смачивания показаны на рис. 3–5. Из рис. 3 следует, что расплав Al–Cu(39 ат. %) смачивает подложки Ni–Cr и Co–Cr, нержавеющей стали 25X18H9C2 и Ti. На подложке Ni–Cr смачивание происходит при $T \sim 1100$ К, порог смачивания подложки Co–Cr данным расплавом наблюдается при $T \sim 1030$ К.

Расплав Al–Cu эвтектического состава при $T \sim 1190$ К полностью растекается на всех изученных подложках (рис. 4). При смачивании подложки из Ni–Cr и титана расплавом Al–Cu(50 ат. %) на политермах выявлен порог смачивания при 925 и 1025 К соответственно. Из рис. 5 видно, что расплав полностью растекается на всех изученных подложках. Смачивание происходит в интервале температур от 920 до 1020 К.

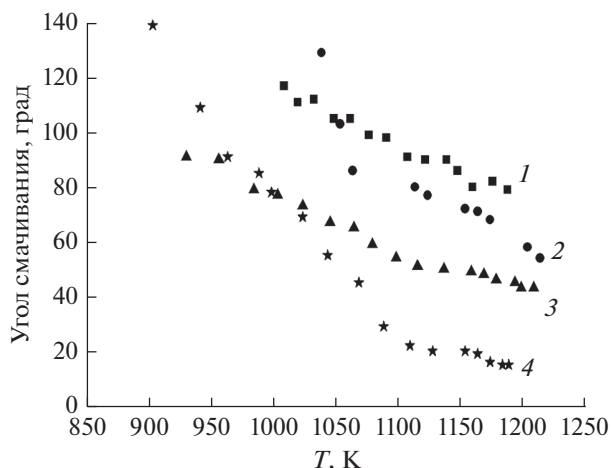


Рис. 3. Политермы углов смачивания расплавом Al–Cu(39 ат. %) подложек: Ni–Cr (1); Co–Cr (2); 25X18H9C2 (3); Ti (4).

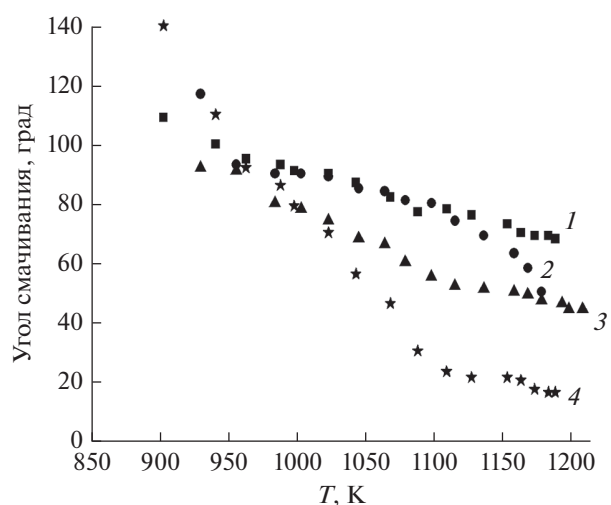


Рис. 4. Политермы углов смачивания эвтектикой системы Al–Cu подложек: Ni–Cr (1); Co–Cr (2); 25X18H9C2 (3); Ti (4).

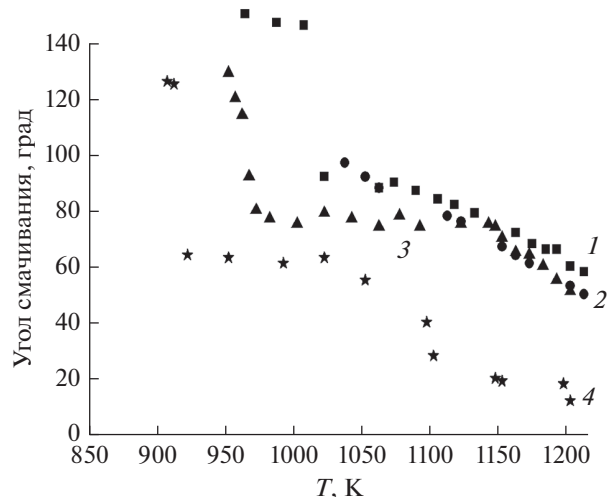


Рис. 5. Политермы углов смачивания расплавом эквивалентного состава 50 ат. % Cu подложек: Ni–Cr (1); Co–Cr (2); 25X18H9C2 (3); Ti (4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом большой капли с использованием новых информационных технологий при обработке контура капли измерены плотность и поверхностное натяжение расплавов Al–Cu различной концентрации в широкой области температур в вакууме 0.01 Па. Плотность и поверхностное натяжение изученных расплавов повышаются с концентрацией Cu в расплаве, а температурная зависимость характеризуется отрицательным температурным коэффициентом.

Исследования смачивания металлических подложек Ni–Cr, Co–Cr, стали 25X18H9C2 расплавом Al–Cu различной концентрации показали, что эти расплавы смачивают подложки и существует порог смачивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атаев Я.Ф., Дедегкаева Л.М., Манукянц А.Р., Понезев М.Х., Пунис В.С., Созаев В.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 11. С. 1577.
2. Елекоева К.М., Касумов Ю.Н., Кутуев Р.А., Понезев М.Х., Манукянц А.Р., Созаев В.А., Хасцаев Б.Д. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 10. С. 48.
3. Дадашев Р.Х., Кутуев Р.А., Созаев В.А. Поверхностные свойства сплавов на основе свинца, олова, индия, кадмия. М.: Физматлит, 2016. 208 с.
4. Орквасов Т.А., Понезев М.Х., Созаев В.А., Шидов Х.Т. // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34. № 3. С. 493.
5. Найдич Ю.В., Еременко В.Н., Кириченко Л.Ф. // Журн. неорган. химии. 1962. Т. 7. № 2. С. 333.
6. Понезев М.Х. Поверхностные свойства некоторых жидкометаллических систем на основе меди, алюминия: Автореф. дис. ... канд. ф.-м. наук: 01.04.15. Нальчик: КБГУ, 2001. 25 с.
7. Курочкин А.Р., Попель П.С., Ягодин Д.А., Борисенко А.В., Охалкин А.В. // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 2. С. 224.
8. Schmitz J., Brillo J., Egly I. // Eur. Phys. J. Special Topics. 2014. V. 223. Iss. 3. P. 469.
9. Ниженко В.К., Флока Л.И. Поверхностное натяжение металлов и сплавов. Справочник. // М.: Металлургия, 1981. С. 208.
10. Курочкин А.Р., Попель П.С., Ягодин Д.А., Борисенко А.В. // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 4. С. 417.
11. Бродова И.Г., Попель П.С., Барбин Н.М., Ватолин Н.А. Расплавы как основа формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 370 с.
12. Brillo J., Egly I., Westphal J. // Int. J. Mat. Res. 2008. V. 99. P. 162.
13. Патент № 2086956 (РФ). Способ определения поверхностного натяжения жидкости, находящейся во взвешенном состоянии / КБГУ. Алтухов В.И., Курданов Х.Ю., Хоконов Х.Б. // 1997.

14. *Stalder A.F., Kulik G., Sage D., Barbieri L., Hoffmann P.* // *Colloids Surf. A.* 2006. V. 286. P. 92.
15. *Камболов Д.А., Кашежеев А.З., Кутуев Р.А., Манукьянц А.Р., Понежев М.Х., Созаев В.А., Шерметов А.Х.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* 2016. № 12. С. 92.
16. *Plevachuk Y., Sklyarchuk V., Yakymovych A., Eckert S., Willers B., Eigenfeld K.* // *Metall. Mater. Trans.* 2008. V. 39a. P. 3040.

Polytherms of Surface Properties of Copper–Aluminum Alloys

**B. S. Karamurзов¹, R. A. Kutuev², M. Kh. Ponegev¹, V. A. Sozaev^{3,*},
A. Kh. Shermetov¹, A. A. Shokarov¹**

¹*Kabardino-Balkaria State University Named after H.M. Berbekov, Nalchik, 360004 Russia*

²*Chechen State University, Grozny, 364907 Russia*

³*North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, 362021 Russia*

**e-mail: sozaeff@mail.ru*

The polytherms of density, surface tension of melts of the Cu–Al system and wetting angles of Ni–Cr, Co–Cr, 25X18H9C2 stainless steel and titanium substrates were studied using the lying drop method. The drop contour was processed using modern information technologies, in particular, using the ImageJ software package. The equations for the polytherms of density and surface tension of melts of the Cu–Al system were obtained. Cu–Al melts were shown to wet the substrates at 1000 K or more. The features of the temperature dependences of the wetting angles were revealed.

Keywords: density polytherms, surface tension, wetting angles.