Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

УДК 532.64:546.311

Краткое сообщение

ПОЛИТЕРМЫ УГЛА СМАЧИВАНИЯ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ РАСПЛАВАМИ СВИНЕЦ-НАТРИЙ

Б.С. Карамурзов¹, Р.А. Кутуев^{2,3}, М.Х. Понежев¹, А.В. Созаев⁴, А.Х. Шерметов¹,
А.А. Шокаров¹

¹ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173

²ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет»

364000, Россия, Чеченская республика, Грозный, ул. А. Шерипова, 32

³ФГБУН «Комплексный научно-исследовательский институт
им. Х.И. Ибрагимова РАН»

364051, Россия, Чеченская Республика, Грозный, Старопромысловское шоссе, 21а

⁴ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)»

362021, Россия, РСО-Алания, Владикавказ, ул. Николаева, 44
sozaeff@mail.ru, shermetov-astemir@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.113

Аннотация: Методом лежащей капли изучена температурная зависимость краевого угла смачивания сплавов $Pb-Na$ разной концентрации на подложках из $Co-Cr$, $Ni-Cr$, нержавеющей стали 25X18H9C2. Измерения проводились методом лежащей капли в широком интервале температур от 359°C до 800°C в атмосфере чистого He марки А. Показано, что значение угла смачивания уменьшается с увеличением температуры, наблюдаются пороги смачивания.

Ключевые слова: политермы угла смачивания, порог смачивания, подложки из $Co-Cr$, $Ni-Cr$, 25X18H9C2.

1. Введение

Изучение поверхностных свойств металлических расплавов на основе свинца играет важную роль в развитии технологии: пайки, литья, рафинировании металлов, при изготовлении новых композиционных материалов, разработке новых жидкометаллических теплоносителей высокоэнергетических установок [1-7]. Сплавы $Pb-Na$, с определенными концентрациями натрия, перспективны в качестве жаростойких теплоносителей ядерных установок [1]. Исследования поверхностных свойств сплавов с малыми добавками щелочных металлов важны также для разработки новых высокоактивных припоев и систем металлизации [2]. Поверхностные свойства систем $Pb-Li$, $Pb-Na$, $Pb-Rb$ в литературе встречаются крайне редко. Вместе с тем подобные данные необходимы для правильного понимания процессов адгезии, смачивания и растекания.

2. Методы исследования

Исследование углов смачивания проводилось методом лежащей

капли. В качестве подложек брались тугоплавкие сплавы: $Co-Cr$, $Ni-Cr$ и нержавеющая сталь $25X18H9C2$. Все эксперименты проводились в вакуумной установке [2] в атмосфере He марки А при температурах от $359^{\circ}C$ до $800^{\circ}C$. Контур капли обрабатывался с помощью программного комплекса ImageJ, базирующегося на численном интегрировании уравнения Юнга-Лапласа [2, 3], который состоит из трех блоков:

1. Блок, связанный с введением в ПЭВМ изображения капли расплава;

2. Вычислительный блок;

3. Блок проведения оценок;

Погрешность измерения угла смачивания 1%.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны политермы углов смачивания чистым свинцом подложек из тугоплавких металлов.

Рис. 1. Политермы углов смачивания чистым Pb подложек из $Ni-Cr$, $Co-Cr$ и нержавеющей стали $25X18H9C2$.

Из рис. 1 видно, что в интервале температур от $500^{\circ}C$ до $600^{\circ}C$ происходит резкое уменьшение углов смачивания. Проявление данного «порога» смачивания можно объяснить разрушением оксидных пленок на поверхности капли расплава. Как известно [2-8], разрушение оксидных пленок происходит в интервале температур $450-600^{\circ}C$. Из рис. 1 видно,

что кривая смачивания подложки из $Ni-Cr$ пересекает кривые смачивания подложек из $Co-Cr$ и стали 25Х18Н9С2.

Из рис. 2, 3 видно, что малые добавки натрия уменьшают краевой угол смачивания подложек из $Ni-Cr$, $Co-Cr$. Причем с увеличением натрия углы смачивания снижаются.

Рис. 2. Смачивание расплавом $Pb-Na$ подложки из $Ni-Cr$.

Рис. 3. Смачивание расплавом $Pb-Na$ подложки из $Co-Cr$.

Более наглядно это видно на рис. 4 при смачивании подложки из стали 25Х18Н9С2. При увеличении температуры углы смачивания снижаются. Но дальнейшее снижение ограничено тем, что начинает «выгорать» натрий, что приводит к уменьшению поверхностной активности расплава.

Рис. 4. Смачивание расплавом *Pb* – *Na* подложки из стали 25Х18Н9С2.

Рис. 5. Концентрационная зависимость адсорбции натрия при разных температурах.

Это объясняется тем, что с увеличением концентрации натрия уменьшается поверхностное натяжение. Как показано в работе [8] в интервале концентраций от 13 ат.% *Na* при 125 °С эта зависимость описывается уравнением $\sigma = 140 - 150 \ln(1 + 0,14x) - 2x$ и теоретически обоснована в работе [9]. Используя данные работы [2], нами рассчитана адсорбция натрия при разных температурах (см. рис. 5).

На рис. 5 показана концентрационная зависимость адсорбции натрия при постоянной температуре ($T = const$), вычисленная по формуле Гиббса:

$$\Gamma = -\frac{n}{kT} \frac{\partial \sigma}{\partial n}, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение, n – концентрация натрия, k – постоянная Больцмана. Из рис. 5 видно, что в концентрационном интервале 0,2–0,3 ат.% *Na* наблюдается рост адсорбции натрия, а максимальная адсорбция натрия наблюдается при температуре 773 К. Это означает, что при этой температуре реализуется максимальное влияние натрия на углы смачивания расплавом *Pb*–0,21 ат.% *Na*.

4. Заключение

С использованием высокотемпературной экспериментальной установки [2] произведены исследования температурной зависимости краевых углов смачивания расплавами *Pb*–*Na* разных тугоплавких металлов, таких как *Ni*–*Cr*, *Co*–*Cr* и сталь марки 25Х18Н9С2. На политермах обнаруживаются «пороги» смачивания, что связано с разрушением оксидных пленок на поверхностях расплавов и процессами взаимодействия расплав – подложка. Показано, что малые добавки натрия существенно уменьшают краевой угол смачивания.

Библиографический список:

1. Хайрулин, Р.А. Плотность и тепловое расширение жидких сплавов системы *Na* – *Pb* с малым содержанием свинца / Р.А. Хайрулин, С.В. Станкус, Р.Н. Абдуллаев // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20. – № 2. – С. 223-226.
2. Karamurзов, B.S. Density and surface tension of lead-sodium melts / B. S. Karamurзов, R.A. Kutuev, M.Kh. Ponezhev, et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2019. – V. 83. – I. 6. – P. 771-773. DOI: 10.3103/S1062873819060182.
3. Елекоева, К.М. Температурная зависимость углов смачивания расплавом *Pb*–0,49 ат.% *Na* пористого никеля / К.М. Елекоева, Ю.Н. Касумов, А.Р. Манукянц и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2017. – Вып. 9. – С. 177-181. DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.177.
4. Kambolov, D.A. Polytherms of density and surface tension of bismuth lead and of angle of wetting of high-nickel and ferritic-martensitic steels by the *Pb*–*Bi* alloy / D.A. Kambolov, A.Z. Kashezhev, R.A. Kutuev, et al. // High Temperature. – 2014. – V. 52. – I. 3. – P. 381-

384. DOI: 10.1134/S0018151X14030146.

5. Handbook on lead-bismuth eutectic alloy and lead properties, materials compatibility, thermal-hydraulics and technologies. – 2015 Ed. – Issy-les-Moulineaux, France: Nuclear Energy Agency Organisation for Economic Co-operation and Development, 2015. NEA. – No. 7268. – 950 p.

6. **Засорин, И.Н.** Исследование свойств сплава натрия – свинец с целью выбора состава пожаробезопасной стойкости теплоносителей / И.Н. Засорин, Л.Н. Кузнецова, В.В. Кумской и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2008. – № 4. – С. 72-77.

7. **Stalder, A.F.** A snake-based approach to accurate determination of both contact points and contact angles / A.F. Stalder, G. Kulik, D. Sage, L. Barbieri, P. Hoffmann // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2006. – V. 286. – I. 1-3. – P. 92-103. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2006.03.008.

8. **Константинов, Вс.А.** Поверхностное натяжение, структура и микротвердость сплавов: свинец-калий, свинец-натрий, свинец-кальций: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / Константинов Всеволод Александрович. – М.: МГУ, 1950. – 7 с.

9. **Семенченко, В.К.** Поверхностные явления в металлах и сплавах / В.К. Семенченко. – М.: Гостехиздат, 1957. – 491 с.

References:

1. **Khairulin, R.A.** The density and thermal expansion of liquid *Na–Pb* alloys with a low content of lead / R.A. Khairulin, S.V. Stankus, R.N. Abdullaev // Thermophysics and Aeromechanics. – 2013. – V. 20. – I. 2. – P. 223-226. DOI: 10.1134/S086986431302008X.

2. **Karamurзов, B.S.** Density and surface tension of lead-sodium melts / B. S. Karamurзов, R.A. Kutuev, M.Kh. Ponezhev, et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2019. – V. 83. – I. 6. – P. 771-773. DOI: 10.3103/S1062873819060182.

3. **Elekoeva, K.M.** Temperaturная zavisimost' uglov smachivaniya rasplavom *Pb–0,49 at.% Na* poristogo nikelya [Temperature dependence of angles of wetting of porous nickel by *Pb–0,49 atomic percent % Na* melt] / K.M. Elekoeva, Y.N. Kasumov, A.R. Manukyants, et al. // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2017. – I. 9. – P. 177-181. DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.177. (In Russian).

4. **Kambolov, D.A.** Polytherms of density and surface tension of bismuth lead and of angle of wetting of high-nickel and ferritic-martensitic steels by the *Pb–Bi* alloy / D.A. Kambolov, A.Z. Kashezhev, R.A. Kutuev, et al. // High Temperature. – 2014. – V. 52. – I. 3. – P. 381-384. DOI: 10.1134/S0018151X14030146.

5. Handbook on lead-bismuth eutectic alloy and lead properties, materials compatibility, thermal-hydraulics and technologies. – 2015 Ed. – Issy-les-Moulineaux, France: Nuclear Energy Agency Organisation for Economic Co-operation and Development, 2015. NEA. – No. 7268. – 950 p.

6. **Zasorin, I.N.** Study of the properties of the sodium-lead alloy in order to select the composition of the fireproof resistance of coolants / I.N. Zasorin, L.N. Kuznetsova, V.V. Kumskoi, et al. // Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. Seriya: Fizika Yadernykh Reaktorov. – 2008. – № 4. – P. 72-77. (In Russian).

7. **Stalder, A.F.** A snake-based approach to accurate determination of both contact points and contact angles / A.F. Stalder, G. Kulik, D. Sage, L. Barbieri, P. Hoffmann // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2006. – V. 286. – I. 1-3. – P. 92-103. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2006.03.008.

8. **Konstantinov, Vs.A.** Poverkhnostnoe natyazhenie, struktura i mikrotverdest' splavov: svinets-kalii, svinets-natrii, svinets-kal'tsii [Surface tension, structure and microhardness of alloys: lead-potassium, lead-sodium, lead-calcium]: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk / Konstantinov Vsevolod Aleksandrovich. – M.: MSU, 1950. – 7 p. (In Russian).
9. **Semenchenko, V.K.** Poverkhnostnye yavleniya v metallakh i splavakh [Surface phenomena in metals and alloys] / V.K. Semenchenko. – M.: Gostekhizdat, 1957. – 491 p. (In Russian).

Short Communication

WETTING ANGLE POLYTERMES FOR LEAD-SODIUM MELTS ON REFRACTORY METALS

B.S. Karamurзов¹, R.A. Kutuev^{2,3}, M.Kh. Ponegev¹, V.A. Sozaev⁴, A.Kh. Shermetov¹,
A.A. Shokarov¹

¹*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia*

²*Chechen State University, Grozny, Russia*

³*Kh. Ibragimov Complex Institute of the RAS, Grozny, Russia*

⁴*North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.113

Abstract: The temperature dependence of the contact angle for *Pb–Na* melts of different concentrations on *Co–Cr*, *Ni–Cr* and stainless steel 25X18H9C2 substrate was studied by the method of a lying drop. Measurements were carried out by a lying drop method in the temperature range from 359 to 800 °C in an atmosphere of pure helium grade A. It is shown that the value of the wetting angle decreases with increasing temperature, wetting thresholds are observed.

Keywords: wetting angle polytherms, wetting threshold, *Co–Cr*, *Ni–Cr*, 25X18H9C2 substrates.

Карамурзов Барасби Сулейманович – академик РАО, д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Кутуев Руслан Азаевич – к.ф.-м.н., доцент, проректор по общим вопросам ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет»

Понежев Мурат Хажисмелович – к.ф.-м.н., доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Созаев Виктор Адыгеевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры физико-математических дисциплин ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

Шерметов Астемир Хусенович – аспирант кафедры физики наносистем, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Шокаров Али Анатольевич – аспирант кафедры физики наносистем, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Barasbi S. Karamurзов – Academician of the Russian Academy of Education, Dr. Sc., Professor, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Ruslan A. Kutuev – Ph. D., Docent, Vice Rector for General Affairs, Chechen State University

Murat Kh. Ponegev – Ph. D., Docent of the Department of Theoretical and Experimental Physics, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Victor A. Sozaev – Dr. Sc., Professor of the Department of Physical and Mathematical disciplines, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)

Astemir Kh. Shermetov – postgraduate student, Department of Physics of Nanosystems, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Aliy A. Shokarov – postgraduate student, Department of Physics of Nanosystems, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Поступила в редакцию/received: 10.04.2020; после рецензирования/revised: 16.06.2020; принята/accepted 06.07.2020.