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 544.344

Краткое сообщение

ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В КОНТАКТНЫХ ПРОСЛОЙКАХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ КОНТАКТНОМ ПЛАВЛЕНИИ МЕДИ И АЛЮМИНИЙ

Ю.Н. Касумов¹, А.Р. Манукянц¹, В.А. Созаев¹, Б.М. Хуболов²

¹ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)»

362021, Россия, РСО-Алания, Владикавказ, ул. Николаева, 44

²ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173
sozaeff@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.120

Аннотация: В настоящей работе предпринимается попытка выявить особенности структуры контактных прослоек при контактном плавлении меди с алюминием марки АМГ-2 (состав мас. %: Mg – 1,8–2,8, Mn – 0,2–0,6, Cu – 0,1, Zn – 0,2, Fe – 0,4, Si – 0,4, остальное – алюминий) и алюминий-литиевым сплавом (Al – 0,4 ат. % Li). Изучение контактного плавления в системе Cu/Al важно для разработки технологии контактно-реактивной пайки, получения слоистых интерметаллических композиционных материалов, создания теплопроводов полупроводниковых приборов, моделирование дендритообразования. Установлено, что в контактных прослойках образуются интерметаллиды, влияющие на хрупкость соединений меди с алюминием и эвтектические структуры.

Ключевые слова: контактное плавление, контактное взаимодействие, система алюминий/медь, эвтектики, фазообразование в контактных прослойках.

1. Введение

Изучение закономерностей контактного плавления (КП) важно с практической точки зрения, так как позволяет оптимизировать технологии контактно-реактивной пайки [1-8], металлизации керамик, полупроводников, создания биметаллических пленок и новых композиционных материалов [9, 10]. Кроме того, использование контактного плавления в технологии соединения разнородных материалов и изделий из них могло бы дать возможность управлять свойствами образующихся переходных слоев.

Целью настоящей работы является изучение с помощью растровой электронной микроскопии контактных прослоек и интерметаллидов, возникающих при контактном плавлении меди с алюминием. В нестационарно-диффузионном режиме осуществлено КП в системе медь/алюминий. В контактных прослойках, изученных с помощью растровой электронной микроскопии, обнаруживаются эвтектики, а также интерметаллические фазы Al_2Li , в некоторых случаях наблюдается дендритообразование. Показано, что кинетика КП меди с алюминием АМГ-2 и $Al-Li$ сплавом протекает по диффузионному механизму.

2. Методика измерений

КП осуществлялось в высокотемпературной установке вакууме 10^{-2} Па [6] в нестационарно-диффузионном режиме при температуре 560°C (КП меди с алюминием начинается при 548°C [2], $T_m(\text{Al}) = 660,45^{\circ}\text{C}$, $T_m(\text{Cu}) = 1064,87^{\circ}\text{C}$) в течение времени от 10 минут до 1 часа. Цилиндрический образец меди находился на алюминиевой подложке. После КП образцы медленно охлаждались, и из них изготавливался продольный шлиф, который изучался с помощью растрового электронного микроскопа Phenom.

3. Результаты исследований

На рис. 1 показан продольный шлиф зоны КП (после травления) Cu с АМГ-2, образовавшейся при КП в течение 20 минут. Из рис. 1 видно, что за 20 минут пластина из АМГ-2 полностью проплавляется (зона 3) в результате КП. Выявлено, что добавки магния в сплаве АМГ-2 повышают скорость КП. На рис. 2 показано образование переходной зоны 2 между зоной 3 и медью (зона 1), толщина которой меняется от 120 до 220 мкм.

Рис. 1. Фотография продольного шлифа КП меди с АМГ-2.

Рис. 2. Фотография переходных зон в контакте меди с АМГ-2, $\times 550$.

На рис. 3 показана контактная прослойка между зоной 3 и 4, где наблюдается дополнительная разрыхленная переходная зона. В зоне 2 наблюдается образование микрокристаллов (микропирамид) имеющих в основании размер ~ 2 мкм. Интерметаллические слои при КП обнаруживались и работе [11]. Показано, что характер образования слоев, а также их количество, состав и толщина в значительной степени определяются наличием естественных диффузионных барьеров, имеющих на поверхности исходных образцов.

В работе [12] разработан и подтвержден опытным путем процесс возникновения при контактном плавлении Cu/Al на поверхности алюминия пленки из алюминидов меди. Соединение медь/ $\text{Al}-\text{Li}$ образовавшееся при КП в течение 20 минут является хрупким. При получении разлома в системе медь/ $\text{Al}-\text{Li}$ в зоне более близкой к $\text{Al}-\text{Li}$ сплаву наблюдаются эвтектики (см. рис. 4-6) с различной структурой.

Рис. 3. Микрофотография переходной зоны, $\times 650$.

Рис. 4. Микрофотография эвтектики образованной на границе медь/ $\text{Al}-\text{Li}$.

а

б

Рис. 5. Микрофотография эвтектики образованной на границе медь/ $\text{Al}-\text{Li}$ со стороны $\text{Al}-\text{Li}$ сплава: а – при увеличении $\times 2500$, б – при увеличении $\times 4900$.

Морфология разлома со стороны Cu характеризуется наличием интерметаллических фаз (см. рис. 7). Наибольшую долю составляют фазы

Al_2Cu . Эти фазы, формируясь на межфазной границе Cu / Al , и являются, по-видимому, причиной охрупчивания соединений образовавшихся при КП. Интерметаллиды образуются и при диффузионном взаимодействии двухслойных пленок медь-алюминий [13].

Рис. 6. Микрофотография эвтектики образованной на границе медь/ $Al - Li$ со стороны $Al - Li$ сплава: а – при увеличении $\times 2350$, б – при увеличении $\times 10000$.

Рис. 7. Микрофотография образовавшихся интерметаллических фаз Cu_nAl_m на межфазной границе медь/ $Al - Li$ со стороны меди, $\times 1400$.

Образцы подвергались рентгенофазовому анализу (см. рис. 8). Видно, что в процессе КП образовывались фазы Cu_nAl_m . Наибольшую объемную долю составляет фаза Al_2Cu , которая имеет тетрагональную структуру (

$a = 0,6066$ нм, $c = 0,487$ нм).

Рис. 8. Диаграмма рентгенофазового анализа исследуемого образца.

4. Заключение

В нестационарно-диффузионном режиме осуществлено КП меди с алюминием при температуре 560 °С. На сколах образовавшейся контактной прослойки были обнаружены интерметаллиды. Показано, что кинетика КП меди с алюминием АМГ-2 и $Al-Li$ сплавами протекает по диффузионному механизму. Диффузионный механизм наблюдается в биметаллах медь-алюминий полученных и в работах [9, 10].

Библиографический список:

1. **Ахкубеков, А.А.** Контактное плавление металлов и наноструктур на их основе / А.А. Ахкубеков, Т.А. Орквасов, В.А. Созаев. – М.: Физматлит. – 2008. – 152 с.
2. **Темукуев, И.М.** Контактное плавление в системах медь-алюминий и медь-титан / И.М. Темукуев // Вестник КБГУ. Серия Физические науки. – 2000. – Вып. 5. – С. 21-24.
3. **Huet, J.J.** Etude des reactions a lietat solide entre $Al-Li$ et Cu / J.J. Huet // Metallurgie. – 1962. – V. 3. – P. 49-53.
4. **Коротков, П.К.** Микроструктура контактных прослоек, образовавшихся при контактном плавлении меди с алюминием / П.К. Коротков, М.З. Лайпанов, А.Р. Манукянц, М.Х. Понежев, В.А. Созаев // Поверхность. Рентгеновские и нейтронные исследования. – 2014. – № 7. – С. 109-112.
5. **Орквасов, Т.А.** Исследование температурной зависимости поверхностного натяжения алюминиевых сплавов / Т.А. Орквасов, М.Х. Понежев, В.А. Созаев, Х.Т. Шидов // Теплофизика высоких температур. – 1996. – Т. 34. – № 3. – С. 492-495.
6. **Понежев, М.Х.** Поверхностные свойства некоторых жидкометаллических систем на

основе меди, алюминия: автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.14 / Понежев Мурат Хажисмелович. – Нальчик: КБГУ, 1998. – 15 с.

7. **Ахкубеков, А.А.** Скорость контактного плавления и фазообразование в системе медь/алюминий АМГ-2 / А.А. Ахкубеков, П.К. Коротков, А.Р. Манукянц, М.Х. Понежев, В.А. Созаев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2016. – Вып. 8. – С. 32-35.

8. **Ахкубеков, А.А.** О роли оксидной пленки в процессе высокотемпературного контактного плавления в системе $Al-Cu$ // А.А. Ахкубеков, С.Н. Ахкубекова, Т.Б. Гуппоев / 12-й Международный симпозиум «Порядок, беспорядок и свойства оксидов», ОДРО-12, Ростов-на-Дону – п. Лоо, 17-22 сентября 2009: труды конференции. – Ростов-на-Дону – пос. Лоо: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2009. – Т. 1. – С. 196-197.

9. **Трыков, Ю.П.** Кинетика роста диффузионных прослоек в биметалле медь-алюминий, полученном по комплексной технологии / Ю.П. Трыков, В.Г. Шморгун, О.В. Слаутин // Перспективные материалы. – 2013. – № 3. – С. 83-88.

10. **Шморгун, В.Г.** Механические свойства СИК системы $Cu-Al$ с интерметаллидной прослойкой, сформированной в твердожидкой фазе / В.Г. Шморгун, Ю.П. Трыков, О.В. Слаутин, С.А. Абраменко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2010. – Вып. 4. – С. 48-51.

11. **Кадирсизова, А.А.** Образование интерметаллических слоев при контактном плавлении / А.А. Кадирсизова, Х.Р. Хаздаев, Р.Б. Верменичев, Д.У. Смагулов // Вестник КазНТУ. – 2015. – № 2. – С. 420-427.

12. **Шморгун, В.Г.** Механизм контактного плавления в системе $Al-Cu$ / В.Г. Шморгун, В.П. Кулевич, В.В. Савченко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – Вып. 2. – С. 21-24.

13. **Ахкубеков, А.А.** Контактное плавление меди с алюминием / А.А. Ахкубеков, П.К. Коротков, А.Р. Манукянц, М.Х. Понежев, В.А. Созаев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2015. – Вып. 7. – С. 59-62.

References:

1. **Akhkubekov, A.A.** Kontaktnoe plavlenie metallov i nanostruktur na ikh osnove [Contact melting of metals and nanostructures on their basis] / A.A. Akhkubekov, T.A. Orkvasov, V.A. Sozaev. – M.: Fizmatlit. – 2008. – 152 p. . (In Russian).

2. **Temukuev, I.M.** Kontaktnoe plavlenie v sistemakh med'-alyuminii i med'-titan [Contact melting in copper-aluminum and copper-titanium systems] / I.M. Temukuev // Vestnik KBGU. Seriya Fizicheskie nauki. – 2000. – I. 5. – P. 21-24. (In Russian).

3. **Huet, J.J.** Etude des reactions a lietat solide entre $Al-Li$ et Cu / J.J. Huet // Metallurgie. – 1962. – V. 3. – P. 49-53.

4. **Korotkov, P.K.** Microstructure of contact layers formed by the contact melting of copper and aluminum / P.K. Korotkov, M.Z. Laypanov, A.R. Manukyants, M.Kh. Ponezhev, V.A. Sozaev // Journal of Surface Investigation. X-ray Synchrotron and Neutron Techniques. – 2014. – V. 8. – I. 4. – P. 722-725. DOI: 10.1134/S1027451014040119.

5. **Orkvasov, T.A.** An investigation of the temperature dependence of the surface tension of aluminum alloys / T.A. Orkvasov, M.Kh. Ponezhev, V.A. Sozaev, Kh.T. Shidov // High Temperature. – 1996. – V. 34. – I. 3. – P. 490-492.

6. **Ponegev, M.Kh.** Poverkhnostnye svoistva nekotorykh zhidkometallicheskih sistem na

osnove medi, alyuminiya [Surface properties of some liquid metal systems based on copper, aluminum]: avtoreferat dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.14 / Ponegev Murat Khazhismelovich. – Nal'chik: KBGU, 1998. – 15 p. (In Russian).

7. **Ahkubekov, A.A.** Skorost' kontaktnogo plavleniya i fazoobrazovanie v sisteme med'/alyuminii AMG-2 [The rate of contact melting and phase transformation in the pair copper / aluminum of AMG-2 brand system] A.A. Ahkubekov, P.K. Korotkov, M.Z. Laypanov, A.R. Manukyants, M.Kh. Ponegev, V.A. Sozaev // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2016. – I. 8. – P. 32-35. (In Russian).

8. **Akhkubekov, A.A.** O roli oksidnoi plenki v protsesse vysokotemperaturnogo kontaktnogo plavleniya v sisteme $Al-Cu$ [On the role of the oxide film in the process of high-temperature contact melting in the $Al-Cu$ system] // A.A. Akhkubekov, S.N. Akhkubekova, T.B. Guppoev / 12-i Mezhdunarodnyi simpozium «Poryadok, besporyadok i svoystva oksidov», ODPO-12, Rostov-na-Donu – p. Loo, 17-22 sentyabrya 2009: trudy konferentsii. – Rostov-na-Donu – pos. Loo: Izd-vo SKNTs VSh YUFU APSN, 2009. – V. 1. – P. 196-197. (In Russian).

9. **Trykov, Yu.P.** Kinetika rosta diffuzionnykh prosloek v bimetallo med'-alyuminii, poluchennom po kompleksnoi tekhnologii [Kinetics of growth of diffusion interlayers in copper-aluminum bimetal obtained by complex technology] / Yu.P. Trykov, V.G. Shmorgun, O.V. Slautin // Perspektivnye materialy. – 2013. – № 3. – P. 83-88. (In Russian).

10. **Shmorgun, V.G.** Mekhanicheskie svoystva SIK sistemy $Cu-Al$ s intermetallidnoi prosloikoi, sformirovannoi v tverdozhidkoi faze [Mechanical properties of LIC system $Cu-Al$ with an intermetallic layer formed in a solid-liquid phase] / V.G. Shmorgun, Yu.P. Trykov, O.V. Slautin, S.A. Abramenko // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2010. – I. 4. – P. 48-51. (In Russian).

11. **Kadirsizova, A.A.** Obrazovanie intermetallicheskikh sloev pri kontaktnom plavlenii [Formation of intermetallic layers during contact melting] / A.A. Kadirsizova, Kh.R. Khazdaev, R.B. Vermenichev, D.U. Smagulov // Vestnik KazNRTU. – 2015. – № 2. – P. 420-427. (In Russian).

12. **Shmorgun, V.G.** Mekhanizm kontaktnogo plavleniya v sisteme $Al-Cu$ [The mechanism of contact melting in the $Al-Cu$ system] / V.G. Shmorgun, V.V. Kulevich, V.V. Savchenko // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2016. – I. 2. – P. 21-24. (In Russian).

13. **Ahkubekov, A.A.** Kontaktnoe plavlenie medi s alyuminiye [The contact melting of copper with aluminum] / A.A. Ahkubekov, P.K. Korotkov, A.R. Manukyants, M.Kh. Ponegev, V.A. Sozaev // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2015. – I. 7. – P. 59-62. (In Russian).

Short Communications

**PHASE FORMATION IN CONTACT LAYERS DURING CONTACT MELTING OF
COPPER AND ALUMINUM**

Y.N. Kasumov¹, A.R. Manukyants¹, V.A. Sozaev¹, B.M. Khubolov²

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

²North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz,
Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.120

Abstract: In this work, an attempt is made to identify the features of the structure of contact layers during the contact melting of copper with aluminum brand AMG-2 (mass composition, %: $Mg - 1,8-2,8$, $Mn - 0,2-0,6$, $Cu - 0,1$, $Zn - 0,2$, $Fe - 0,4$, $Si - 0,4$, rest – aluminum) and

aluminum-lithium alloy ($Al - 0,4 \text{ wt.}\% Li$). The study of contact melting in the system is important for development of contact-reactive soldering technology, obtaining layered intermetallic composite materials, creating heat sinks for semiconductor devices, modeling dendrite formation. It was established that intermetallic compounds are formed in the contact layers, which affect the brittleness of copper-aluminum compounds and eutectic structures.

Keywords: contact melting, contact interaction, aluminium/copper system, euthetics, phase formation in contact layers.

Касумов Юрий Надирович – к.ф.-м.н., доцент кафедры физико-математических дисциплин ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

Манукянц Артур Рубенович – к.ф.-м.н., кафедры физико-математических дисциплин ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

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

Хуболов Борис Магомедович – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Управления научных исследований и инновационной деятельности, заведующий лабораторией электрохромных материалов кафедры экспериментальной и теоретической физики Института физики и математики ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Yuriy N. Kasumov – Ph. D., Docent of the Department of Physical and Mathematical disciplines, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)

Artur R. Manukyants — Ph. D., Docent of the Department of Physical and Mathematical disciplines, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)

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

Boris M. Khubolov – Ph. D., Leading Researcher of Management Research and Innovation Department, Head of the Laboratory of Electrochromic Materials, Department of Experimental and Theoretical Physics, Institute of Physics and Mathematics, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Поступила в редакцию/received: 04.09.2020; после рецензирования/reviced: 04.10.2020; принята/accepted 11.10.2020.