

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 620.22:54-29:546.73

Комплексное использование  
минерального сырья. № 1. 2018.

Р. К. АУБАКИРОВА<sup>1</sup>, Ю. Н. МАНСУРОВ<sup>2</sup>, Б. М. СУКУРОВ<sup>1\*</sup>, Г. М. ИБРАЕВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт металлургии и обогащения, КазННТУ имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан,  
\*e-mail: bsukurov@gmail.com

<sup>2</sup>Московский институт стали и сплавов, Москва, Россия

## МНОГОСЛОЙНАЯ СТРУКТУРА ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ В ДИФФУЗИОННОЙ ЗОНЕ СИСТЕМЫ Al-Co

**Резюме.** В работе методом контактного плавления исследована диффузионная зона системы Al-Co. Микроструктура и элементный состав образцов изучены в поперечном сечении с помощью растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа (РЭМ-РСМА). После изотермической выдержки в интервале 700-1375 °С сформировалась многослойная структура интерметаллидов системы Al-Co. При взаимодействии алюминия с кобальтом ширина диффузионной зоны увеличивается с возрастанием продолжительности изотермической выдержки. В контактной зоне образуется несколько слоев различного фазового состава и ширины в зависимости от установившейся концентрации металлов. Каждый наблюдаемый слой обладает четкими границами и характерной структурой. При 1300-1375 °С путем сопоставления распределения элементов по глубине диффузионной зоны с ее микроструктурой выявлены четыре соединения переменного состава  $Al_{21}Co_{79}$ ,  $Al_{44}Co_{56}$ ,  $Al_{20}Co_{80}$  и  $Al_{27}Co_{73}$ , предположительно относящиеся к бертоллидам. Со стороны кобальта слои характеризуются гомогенностью и более гладкими границами, в то время как со стороны алюминия структура слоев приобретает островковый вид, а границы становятся неправильной формы с появлением фестонов. При разных температурах получены интерметаллические соединения, соответствующие ранее установленным фазам фиксированного состава (дальтонида):  $Al_9Co_2Al_{13}Co_4$ ,  $Al_3Co$ ,  $Al_5Co_2$  и  $AlCo$  (бертоллид). Выявлены скопления пор и трещин, которые могут быть обусловлены напряжениями между слоями. Порообразование в случае развитой слоистой микроструктуры связывается с эффектом Френкеля.

**Ключевые слова:** контактное плавление, растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, диффузионная зона, многослойная структура, интерметаллиды, диаграмма Al-Co, алюминий, кобальт

**Введение.** При изучении закономерностей строения диффузионной зоны методом диффузионных пар определяются как характер распределения элементов, так и условия образования слоев интерметаллидов. Принцип метода состоит в том, что диффузионную пару, составленную из двух элементов, выдерживают при соответствующей температуре в течение времени, достаточном для того, чтобы произошло значительное перераспределение элементов при диффузии. Диффузия приводит систему к состоянию с минимальной свободной энергией, или к состоянию равновесия [1]. При этом в диффузионной зоне ожидаются все промежуточные фазы в той же последовательности, в какой они существуют на соответствующей диаграмме состояния при данной температуре. Таким образом, возникает возможность построения фрагментов диаграмм состояния путем изучения изменения концентрации компонентов в диффузионном слое. Скачки в изменении состава соответствуют границам однофазных областей на диаграммах состояния. Соприкасающиеся фазы в диффузионном слое являются фазами, находящимися в равновесии друг с другом [2].

В большинстве бинарных систем взаимная диффузия сопровождается возникновением новых фаз: твердых растворов, существующих в ограниченном интервале концентраций, интерметаллических фаз, имеющих либо строго фиксированный состав (дальтонида), либо переменный, существуя в некоторой ограниченной области (бертоллиды) [2]. Несмотря на то, что система Al-Co широко изучена в ряде оригинальных работ, в то же время продолжается выявление новых фаз, в том числе с переменным составом.

Температурно-временные условия получения новых фаз в виде интерметаллических соединений могут быть положены в основу новых методов порошковой металлургии с использованием интерметаллидов широкого применения. Нужно отметить, что со стремительным развитием аддитивных технологий порошковая металлургия приобретает новые перспективы [3]. Аддитивная технология имеет огромный потенциал в деле снижения затрат на создание самых разнообразных видов продукции, например, в авиационной промышленности, энергомашино-

строении, приборостроении — везде, где есть потребность в изделиях сложной геометрии и «выращивании» металлических деталей. В этом плане благодаря своим уникальным свойствам интерметаллиды обязательно найдут свое применение в аддитивных технологиях.

**Целью работы** является изучение особенностей формирования слоистых структур в диффузионной зоне между алюминием и кобальтом.

**Экспериментальная часть. Материалы и методы исследования.** Метод диффузионных пар был применен к исследованию системы Al-Co. Более подробно с методом можно ознакомиться в работах [4-5]. Образцы получали при температурах изотермической выдержки от 700 °С до 1300 °С с шагом 100 °С и времени выдержки от 4 до 8 ч. В качестве исходных материалов использовали алюминий высокой чистоты (99,999 % Al) и кобальт (99,98 % Co) в виде пластин массой до 30 г. Такие пластины помещали на дно кварцевой ампулы, которую одновременно вакуумировали и запаивали. Термообработку вели в камерной печи НТС 08/16. Скорость охлаждения образцов была нерегулируемой и определялась скоростью охлаждения ампулы на воздухе.

Образцы для исследования методами растровой электронной микроскопии и рентгено-спектрального микроанализа (РЭМ-РСМА) готовили с соблюдением требований, предъявляемых к размерам и качеству подготовки поверхности. Шлифы подготавливали обычными методами с использованием тонкого механического шлифования и полирования Tegamin 25 (STRUERS). Исследования РЭМ-РСМА выполняли на микроанализаторе JXA-8230 фирмы JEOL при увеличениях от  $\times 100$  до  $\times 6500$  с использованием программы EPMA. Элементный состав фаз, образующихся в диффузионной зоне, определялся с помощью точечного детектирования с применением энергодисперсионного спектрометра (ЭДС).

Современная диаграмма состояния Al-Co не является окончательной, она постоянно уточняется [6-8], поэтому широко используемые сведения в научно-технических справочниках [9-12] быстро устаревают. В этих целях в работе используются литературные данные, вошедшие в обновляемую базу дифрактометрических данных PDF-2 [9].

**Результаты и их обсуждение.** При температурах выше точки плавления алюминия (658 °С) диффузионная зона имеет слоистое строение. В этих слоях выявлены существующие интерметаллические соединения строго фикси-

рованного состава (рисунок 1). В процессе взаимодействия твердого и жидкого металлов (1000-1300 °С) имеет место ярко выраженное явление ориентированного роста кристаллов - эпитаксия. Картина этого явления заключается в том, что границы зерен, формирующихся слоев одних промежуточных фаз находят продолжение в структуре слоев других промежуточных фаз. Поверхность контакта расплава является неровной, как и у последующих слоев, отличающихся между собой контрастом изображения РЭМ, структурой, шириной и формой границ между ними.

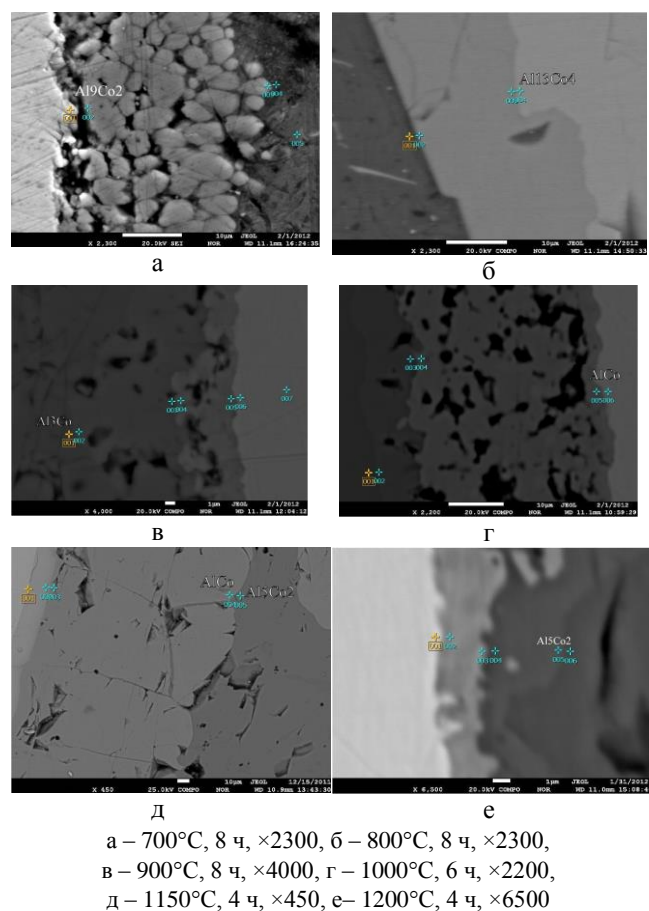


Рисунок 1 – Точки ЭДС-микроанализа и выявленные интерметаллиды

При съемках создавались условия, когда вся диффузионная зона помещается в один кадр, что обеспечивает проведение микроанализов с уменьшением относительной ошибки. Границы слоев, сами слои и предполагаемые фазы в диффузионной зоне хорошо выявляются при ее исследовании в режиме обратнорассеянных электронов, что связано с более ярким высвечиванием участков с большим средним атомным номером по сравнению с участками, составляющими общий фон [13]. Это позволяет снизить ошибки

при проведении микроанализа вблизи с границами слоев в диффузионной зоне, за счет попадания электронного пучка в область, где происходит возбуждение характеристического рентгеновского излучения атомов из соседней фазы.

При формировании диффузионной зоны в интервале 700-1150 °С в слоях, ближайших к алюминию, образуется цепочка пор (рисунки 1 а, в, г и д); аналогичное явление наблюдалось в системе Al-Ni [14]. Одной из возможных причин формирования пор служит эффект Френкеля с возникновением направленного потока вакансий, который является неотъемлемой частью при вакансионном механизме диффузии. В результате в области, где поддерживается пересыщение вакансиями, возникают зародыши пор, которые могут как расти, так и залечиваться [2]. Судя по распределению пор в поперечном сечении можно предположить о вакансионном потоке, который направлен из алюминия в кобальт. Причина, по которой эффект Френкеля не наблюдается при контакте металлов выше 1150°С, по-видимому, объясняется аннигиляцией вакансий, высокими коэффициентами диффузии алюминия и кобальта в фазах, в которых они образовывались при более низких температурах.

С повышением температуры диффузионного взаимодействия алюминия с кобальтом меняется количество слоев и их ширина (Рисунок 1).

В процессе охлаждения слои, контактирующие с расплавом при температурах выше 1000 °С, претерпевают превращение по перитектической реакции, и этот эффект усиливается с повышением температуры. Так, после изотермической выдержки при 1200 °С при охлаждении образцов происходит столь интенсивная перитектическая реакция, что образовавшееся слой соединения практически полностью распадается.

В Таблице 1 показаны интерметаллиды системы Al-Co, обнаруженные в настоящем исследовании в сопоставлении со справочными данными.

Последовательность формирования фаз (по температурной шкале) соответствует диаграмме состояния Al-Co, и составы обнаруженных в настоящем исследовании соединений близки к известным фазам. Между тем, в диффузионной зоне обнаруживаются не все фазы.

Так, при 700 °С выявлено только 3 из 5 известных фаз, а при 800 °С – только 2 фазы.

По-видимому, это связано с низкой скоростью диффузии в фазах, имеющих высокую концентрацию по кобальту. Такое поведение подтверждается существенно меньшей шириной этих слоев в диффузионной зоне при температурах 700-800 °С в сравнении с фазами вблизи с зоной расплава.

Выше 1000 °С диффузионная зона Al-Co формируется в виде 4 слоев с ярко выраженной

Таблица 1 – Интерметаллиды системы Al-Co [6-8]

Интерметаллиды	Литературные источники					Данные эксперимента				
	Al <sub>9</sub> Co <sub>2</sub>	Al <sub>13</sub> Co <sub>4</sub>	Al <sub>3</sub> Co	Al <sub>5</sub> Co <sub>2</sub>	AlCo	Al <sub>9</sub> Co <sub>2</sub>	Al <sub>13</sub> Co <sub>4</sub>	Al <sub>3</sub> Co	Al <sub>5</sub> Co <sub>2</sub>	AlCo
Примечание	Монокл. P21/a (14) [9]	Монокл. Cm (8) [10]	Монокл. C(0) [11]	Гексагон. P63/mmc (194) [12]	Кубич. Pm-3m (221) [9]	Рис. 1 а	Рис. 1 б	Рис. 1 в	Рис. 1 г, е	Рис. 1 г, д
Т, °С	Концентрация кобальта (ат. %)									
700	17.3-19.2	23.2-23.4	24.9-25.2	27.5- 28.8	49.3-53.8	17.51 - 18.2			28.30	50.50
800	17.3-19.2	23.2-23.4	24.9-25.2	27.5- 28.8	49.3-53.8	–	23.25	24.24	–	–
900	17.3-19.2	23.2-23.4	24.9-25.2	27.5- 28.8	49.3-53.8	–	–	24.98	–	–
1000	–	23.2-23.4	24.9-25.2	27.5- 28.8	49.3-53.8	–	–	–	–	50.61
1150	–	–	–	27.5- 28.8	49.3-53.8	–	–	–	29.61	50.22
1200	–	–	–	–	49.3-53.8	–	–	–	28.41	51.04
1300	–	–	–	–	49.3-53.8	–	–	–		49.86 - 50.73
1350	–	–	–	–	49.3-53.8	–	–	–	29.26	
1375	–	–	–	–	49.3-53.8	–	–	–	28.72 - 29.18	49.89 - 51.13

границей раздела с переходом, через которую происходит скачок концентрации кобальта.

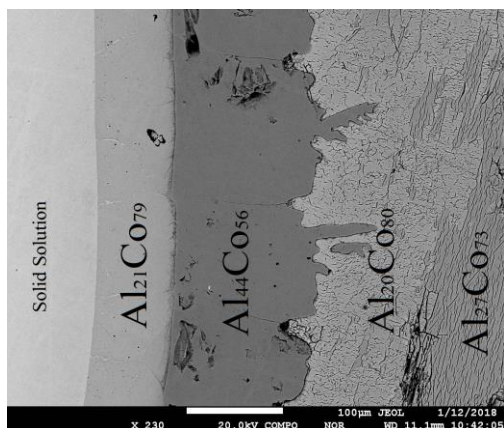
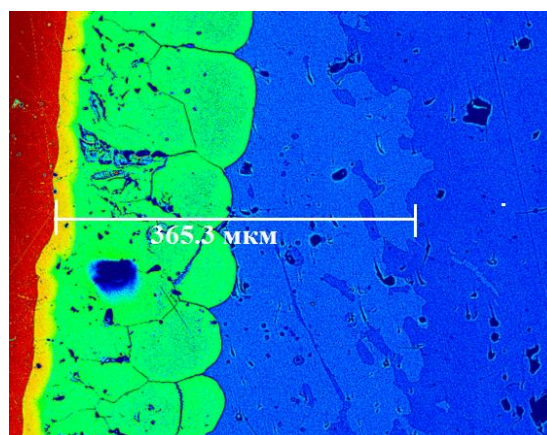


Рисунок 2 – Слои диффузионной зоны, 1350 °С, × 230

По-видимому, аналогичные концентрационные скачки наблюдаются и при более высоких температурах. Так, на рисунке 2 показана микрофотография образца после обработки при 1350 °С, где можно заметить четыре слоя с четкими границами и характерной структурой. Со стороны кобальта слои характеризуются однородностью и более гладкими границами. В то время как со стороны алюминия структура слоев приобретает островковый вид, а границы становятся неправильной формы с появлением фестонов. Такая картина наблюдается и после других обработок при высоких температурах 1300-1375 °С. Эти слои отвечают четырем соединениям переменного состава:  $Al_{21}Co_{79}$  (1 слой),  $Al_{44}Co_{56}$  (2 слой),  $Al_{20}Co_{80}$  (3 слой) и  $Al_{27}Co_{73}$  (4 слой). Новое соединение Al-Co с нестандартной формулой было получено в работе [15] в случае смешивания порошков Al с порошком интерметаллида  $Al_9Co_2$ . Предположительно такие соединения следует отнести к бертоллидам [16].

Концентрационные скачки наблюдаются на границах слоев или вблизи них. В структуре диффузионной зоны прослеживаются общие границы слоев, в частности, границы слоя со стороны кобальта находят продолжение в следующем слое. При этом в некоторых случаях в процессе изотермической кристаллизации слои приобретают островковый вид, а на их границах появляются фестоны (Рисунок 3). На рисунке 3 слева-направо показана диффузионная зона, которая состоит из следующих слоев:  $Al_{20}Co_{80}$ ,  $Al_{45}Co_{55}$  (которая при повышенных температурах не отличается от  $(AlCo-\beta')$ ) и  $Al_{68}Co_{32}$ .

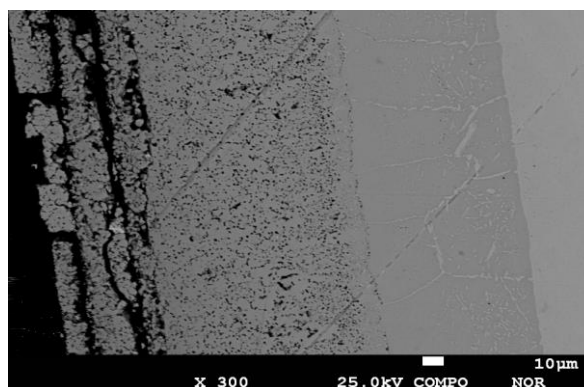
Ширина диффузионной зоны, формирующейся в течение 4 ч при температуре 1150 °С составляет 365 мкм. Важно отметить, что самые узкие слои наблюдаются со стороны кобальта. В следующем слое граница приобретает вид натянутых дуг (в виде менисков с соответствующими точками закрепления). Далее в структуре слоя проявляются островки, которые, по-видимому, представляют собой фестоны, отделившиеся со стороны алюминия. Мениски могут образовываться за счет сил поверхностного натяжения на границах между слоями. Заметим,



Система Al-Co (1150 °С, 4 ч) ×200

Рисунок 3 – Диффузионная зона с образованием слоев

что островки и фестоны имеют общие морфологические признаки. Это указывает на то, что островки представляют собой остатки фестонов, отделившихся от своего слоя. Такое поведение присуще процессу растворения одной фазы в другой.



Система Al-Co (1300°C, 4 ч) ×300

Рисунок 4 – Пример скопления пор и трещинообразования в диффузионной зоне



## ЛИТЕРАТУРА

Знания о поведении межфазных границ имеет большое значение в свете применимости интерметаллических материалов в аддитивных технологиях. В этой связи необходимо упомянуть о факте трещинообразования (Рисунок 4).

Образование трещин может быть обусловлено напряжениями между слоями, возникшими за счет разности объемов элементарных ячеек фаз, принадлежащих различным сингониям. Такое направление исследований может предупредить нежелательное соседство интерметаллидов таких типов с точки зрения совместимости некоторых слоев на практике применительно к аддитивным технологиям. Судя по формированию трещины в области диффузионной зоны с развитой пористостью можно заключить, что основной причиной ее возникновения является вакансионный механизм диффузии, приведший к сток-у вакансий в поры и возникновению сильных внутренних напряжений.

**Выводы.** Наблюдение и идентификация структурных особенностей в диффузионной зоне Al-Co, полученной методом диффузионных пар, в области температур 700-1375 °С, выявленных с помощью РЭМ-РСМА, позволяют сделать следующие выводы: в диффузионной зоне образуется несколько слоев различного фазового состава и ширины в зависимости от установившейся концентрации металлов. Выявлены четыре новые соединения переменного состава  $Al_{21}Co_{79}$ ,  $Al_{44}Co_{56}$ ,  $Al_{20}Co_{80}$  и  $Al_{27}Co_{73}$  предположительно относящиеся к бертоллидам. При разных температурах получены интерметаллические соединения, которые соответствуют ранее установленным фазам фиксированного состава – дальтонидам:  $Al_9Co_2$ ,  $Al_{13}Co_4$ ,  $Al_3Co$ ,  $Al_5Co_2$  и бертоллиду AlCo.

Обнаруженные особенности порообразования в диффузионной зоне Al-Co позволяют рекомендовать повышать температуру спекания для порошков Al и Co при изготовлении жаропрочных материалов из соединения Al-Co.

Подтверждено, что метод диффузионных пар особенно эффективен в экспериментах по определению и характеристике фаз с геометрией поперечного сечения.

*Работа выполнена в рамках Государственного заказа РК по программе: «Грантовое финансирование научных исследований» (грант № 203/1 №1196/ГФ4) «Создание основ технологии производства высокопрочных и жаростойких интерметаллических суперсплавов на базе алюминидов методом порошковой металлургии (2015-2017гг).*

1 Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978. – С. 248.

2 Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. – М.: Наука, 1979. С. – 344.

3 Murr L.E., Johnson W.L. 3D metal droplet printing development and advanced materials additive manufacturing // Journal of Materials Research and Technology. – 2017. – N 6(1). – P. 77–89. doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.11.002

4 Паничкин А.В. Исследование формирования структуры диффузионной зоны в бинарных системах Cu-Ni, Bi-Sb и Mg-Cd методом диффузионных пар: 05.16.01. дисс. ... канд. тех. наук. / Институт металлургии и обогащения. – Алматы: 2006. – С. 125.

5 Ибраева Г.М., Сукуров Б.М. Исследование диффузионной зоны жаропрочных сплавов системы Al-Co, формирующейся в изотермических условиях // Инновационное развитие и востребованность науки в современном Казахстане: сб. тр.V междунар. науч. конф. – Алматы, Казахстан, 2011. – Ч. 4. – С.175–178.

6 Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник. Под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – Т. 1. – С. 992.

7 Фазовая диаграмма системы Al-Co [Электрон. ресурс]. – 2011. – URL: <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Al-Co.php> (дата обращения: 06.12.2017)

8 Диаграмма состояния системы Al-Co [Электрон. ресурс]. – 2005. – URL: <http://markmet.ru/diagrammy-splavov/diagramma-sostoyaniya-sistemy-alyuminiy-kobalt> (дата обращения: 06.12.2017).

9 JCPDS—International Centre for Diffraction Data, [Электрон. ресурс]. – 2013. – URL: <http://www.icdd.com/products/technicalbulletins/PDF2> (дата обращения: 06.12.2017)

10 Burkhardt U., Ellner M., Grin Yu. Powder diffraction data for the intermetallic compounds  $Co_2Al_5$ , monoclinic- $Co_4Al_{13}$  and orthorhombic o- $Co_4Al_{13}$  // Powder Diffraction. – 1996. – №11 (2). – P. 123–128. <https://doi.org/10.1017/S0885715600009106>.

11 Mo Z.M., Sui H.X., Ma X.L., Kuo K.H. Structural Models of t2-Inflated Monoclinic and Orthorhombic Al-Co Phases // Metallurgical and Materials. Transactions A. – 1998 – V. 29a. – P. 1565–1572.

12 Ew Kirk J. B., Black P. J., Damjanovic A. The refinement of the  $Co_2Al_5$  Structure // Acta Cryst. – 1961. – № 14. – P. 532.

13 Рид С. Дж. Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. – М.: Техносфера, 2008. – С. 232.

14 Аубакирова Р.К., Паничкин А.В., Алпысбай И.М., Жумаканова В.Р. Структурно-фазовые превращения при контактном плавлении пары алюминий-никель // Вестник КазНУ им. аль-Фараби. Сер. физ. – 2012. – № 3(42) – С. 136–140.

15 Tsurui T., Tsai A.P., Inoue A., Masumoto T. Mechanical alloying of aluminium and  $Al_{13}Co_4$  to an amorphous phase // Journal of Alloys and Compounds. – 1995. – № 218 – P. L7–L10. doi.org/10.1016/0925-8388(94)01413-2

16 Бокий Г.Б. Кристаллохимия. Изд. 3-е. – М.: Наука, 1971. –С. 400.

## REFERENCES

1 Bokshtein B.S. *Diffiziya v metallakh* (Diffusion in metals). Moscow: Metallurgiya, 1978, 248. (in Russ.)

2 Geguzin Ya.E. *Diffuzionnaya zona* (Diffusion zone). Moscow: Nauka, 1979, 344. (in Russ.)

3 Murr L.E., Johnson W.L. 3D metal droplet printing development and advanced materials additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2017. 6(1). 77–89. doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.11.002.(in Eng.)

4 Panichkin A.V. Issledovanie formirovaniya struktury difuzionnoi zony v binarynykh sistemakh Cu-Ni, Bi-Sb i Mg-Cd metodom difuzionnykh par (Study for formation of diffusion zone structure in binary systems Cu-Ni, Bi-Sb, and Mg-Cd using methods of diffusion couples): 05.16.01.. *diss. .. kand. tekh. nauk.* (Thesis for Scientific Degree: candidate for tec. sci.) / Institute of Metallurgy and Ore Benefication. Almaty. **2006.** 125 (In Russ.)

5 Ibrayeva G.M., Sukurov B.M. *Issledovanie difuzionnoi zony zharoprochnykh splavov sistemy Al-Co, formiruyusheysya v izotermicheskikh usloviyakh* (Study of diffusion zone refractory alloys of Al-Co system formed at isothermal conditions). *Innovatsionnoe razvitiye i vostrebovannost' nauki v sovremennoy Kazakhstane* (Innovative development and relevance of science in modern Kazakhstan): *sb. tr. 5-oy Mezhdunar. nauch. konf.* (Proceedings of 5<sup>th</sup> international sci. conf.). Almaty. **2011.** 4. 175–178. (in Russ.)

6 *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskiykh sistem. Spravochnik* (Diagrams of binary metal systems. Reference book). *Pod red.* (under editorship of ) Lyakishev N.P. Moscow: Mashinostroenie. **1996.** 1, 992. (in Russ.)

7 Diagrams of Al-Co. [Electron. resource] **2011.** URL: <http://www.himikatus.ru/Al-Co.php>. (access date: 06.12.2017). (in Eng.)

8 *Diagramma Al-Co* (Diagrams of Al-Co). [Electron. resource] **2005.** URL: <http://markmet.ru/Al-Co> (access date: 06.12.2017). (in Russ.)

9 JCPDS - *International Centre for Diffraction Data*, [Electron. resource] **2013.** URL: <http://www.icdd.com/products/technicalbulletins/PDF2>. (in Eng.)

10 Burkhardt U., Ellner M., Grin Yu. Powder diffraction data for the intermetallic compounds  $\text{Co}_2\text{Al}_5$ , monoclinic- $\text{Co}_4\text{Al}_{13}$  and orthorhombic  $\text{o-Co}_4\text{Al}_{13}$ . *Powder Diffraction.* **1996.** 11(2). 123–128. <https://doi.org/10.1017/S0885715600009106>. (in Eng.)

11 Mo Z.M., Sui H.X., Ma X.L., Kuo K.H. Structural Models of t2-Inflated Monoclinic and Orthorhombic Al-Co Phases. *Metallurgical and Materials. Transactions A.* **1998.** 29a. 1565–1572. (in Eng.)

12 Newkirk J. B., Black P. J., Damjanovic A. The refinement of the  $\text{Co}_2\text{Al}_5$  Structure. *Acta Cryst.* **1961.** 14, 532–533. (in Eng.)

13 Read S. J. B. *Ehletromnozodovyi mikroanaliz i rastrovaya elektronnyaya mikroskopiya v geologii* (Electron probe microanalysis and scanning electron microscopy in geology). Moscow: Technosphere. **2008.** 232. (in Russ.)

14 Aubakirova R.K., Panichkin A.V., Alpysbay I.M., Zhumakanova V.R. *Strukturno-fazovye prevrasheniya pri kontaktno vplavlenii pary alyuminiy-nikel* (Structural phase transformations at contact melting of Al-Co couple). *Vestnik KazNU im. al-Farabi. Ser fiz.= Herald of KazNU of al-Farabi. Ser physics.* **2012.** 3(42). 136–140. (in Russ.)

15 Tsurui T., Tsai A.P., Inoue A., Masumoto T. Mechanical alloying of aluminum and  $\text{Al}_{13}\text{Co}_4$  to an amorphous phase. *Journal of Alloys and Compounds.* **1995.** 218, L7–L10. [doi.org/10.1016/0925-8388\(94\)01413-2](https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)01413-2). (in Eng.)

16 Bokij G.B. *Kristallokhimiya* (Crystal chemistry). 3<sup>rd</sup> issue. Moscow: Nauka. **1971.** 400. (in Russ.)

## ТҮЙІНДЕМЕ

Жұмыста Al-Co жүйесінің диффузиялық аймағы түйіспелі балқыту әдісімен зерттелген. Микроқұрылымы және элементтік құрамы үлгілердің көлденең қимасында растрлық электрондық микроскопия және рентгеноспектралды микроталдау (РЭМ-РСМА) көмегімен зерттелді. Изотермиялық ұзақтықтан кейін 700-1375 °C аралығында Al-Co жүйесінде интерметаллидтердің көп қабатты құрылым қалыптасты. Түйіскен аймақта фазалық құрамы әртүрлі және металдардың шоғырлану белгісіне қарай бірнеше қабаттары орнаған ені құрылады. Әрбір байқалған қабаттың айқын белгіленген шекаралары бар және өзіне тән құрылымы бар. Әр қабаттың өсу жылдамдығы күрделі түрде температура мен изотермиялық ұстау уақытына тәуелді. 1300-1375 °C аралығында салыстыру арқылы, диффузиялық аймақта элементтерді тереңдігі бойынша бөлу, оның микроструктурасында шамамен бертоллидке жататын, ауыспалы құрамы бар  $\text{Al}_{21}\text{Co}_7$ ,  $\text{Al}_{44}\text{Co}_{56}$ ,  $\text{Al}_{20}\text{Co}_{80}$  және  $\text{Al}_{27}\text{Co}_{73}$  төрт қосылыс анықталды. Кобальт тарапынан қабаттар гомогенноді және шекаралары біртегіс болып сипатталады. Ал алюминий тарапынан қабаттардың құрылымы фестондардың пайда болуымен шекаралары айқын емес, пішіні арал түрін иеленеді. Әртүрлі температурада интерметалдық қосылыстар алынған, олар бұрын тіркелген фазаларға құрамымен AlCo (бертоллид) және  $\text{Al}_9\text{Co}_2$ ,  $\text{Al}_{13}\text{Co}_4$ ,  $\text{Al}_3\text{Co}$ ,  $\text{Al}_5\text{Co}_2$  (дальтонидтерге) сәйкес келеді. Анықталған қабаттар арасындағы көп кеуектер мен жарықшақтардың болуы кернеу әсерінен мүмкін. Микроқұрылымың қабаттары дамыған жағдайда кеуектердің пайда болуы Френкель әсерімен байланысады.

**Түйін сөздер:** түйіспелі балқыту, растрлық электрондық микроскопия, рентгеноспектралды микроталдау, диффузиялық аймақ, көп қабатты құрылым, интерметаллидтер, Al-Co диаграммасы.

## ABSTRACT

The diffusion zone of Al-Co system was studied using the contact melting method. The microstructure and element composition in cross section of samples were studied by scanning electron microscopy and electron probe microanalysis (SEM-EPMA). The multilayer structure of intermetallics of Al-Co system formed after isothermal treatment in range of 700-1375 °C. Due to interaction between aluminum and cobalt the width of diffusion zone is growing with isothermal treatment duration rise. Few layers having different phase compositions and widths form in contact zone depending on steady-state concentration of metals. Each of the observed layers has its own clear boundaries and structure pattern. Four compounds with the variable compositions  $\text{Al}_{21}\text{Co}_7$ ,  $\text{Al}_{44}\text{Co}_{56}$ ,  $\text{Al}_{20}\text{Co}_{80}$ , and  $\text{Al}_{27}\text{Co}_{73}$  (presumably berthollides) have been revealed at 1300-1375 °C due to comparison of element distribution along the depth of diffusion zone with its microstructure. The layers are seemed as homogenous and having more smooth boundaries from cobalt side. Meanwhile from aluminum side the layer structure acquires the island-type form, and boundaries become more irregular with festoons appearance. The intermetallic compounds obtained at various temperatures correspond to pre-established phases with registered compositions (daltonides):  $\text{Al}_9\text{Co}_2$ ,  $\text{Al}_{13}\text{Co}_4$ ,  $\text{Al}_3\text{Co}$ ,  $\text{Al}_5\text{Co}_2$ , and AlCo (berthollide). The agglomerates of pores and cracks could be caused by stresses between the layers are detected. The formation of pores in case of the developed layer microstructure relates to Frenkel effect.

**Keywords:** contact melting, scanning electron microscopy, electron probe microanalysis, diffusion zone, multilayer structure, intermetallic, Al-Co diagram, aluminum, cobalt

*Поступила 15.12.2017.*