

Министерство науки и высшего образования РФ
Российская Академия Наук
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»
ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН»
АО Научно-производственное объединение «МКМ»

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ: КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ТЕХНОЛОГИИ

Тезисы
X Всероссийской конференции
26–29 марта 2025 года

ФГБОУ ВО «УдГУ»
Удмуртский университет

Ижевск
2025

УДК 669.017.3:681.3.06 (043.3)
ББК 34.3

Главный редактор П. К. Галенко
Ответственный редактор В. Е. Анкудинов

К26 Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии: Тезисы X Всероссийской конференции. – Ижевск: Удмуртский университет, 2025. – 241 с.

Solidification: computer simulation, experiments and technology: Abstracts of the X All-russian conference. – Izhevsk: Udmurt University, 2025. – 241 p.

ISBN XXX

Настоящий сборник содержит тезисы докладов участников X Всероссийской конференции «Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии» (КРИС-2025, 26–29 марта 2025 года, УдГУ), посвященной актуальным проблемам теории, эксперимента и разработки компьютерных технологий процессов макро- и микроскопической кристаллизации.

Рассмотрены процессы структурообразования в сплавах, процессы высокоскоростной кристаллизации, современные проблемы в областях атомистической динамики, аморфных систем, образования микроструктур и старения сплавов, а также связанные с металлургическими, литейными и аддитивными технологиями.

ISBN XXX

УДК 669.017.3:681.3.06 (043.3)
ББК 34.3

© Коллектив авторов, 2025
© Удмуртский университет, 2025

Влияние экстремальных воздействий на структуру заэвтектических сплавов Al-Co

Т. М. Сабурова¹, С. Г. Меньшикова²

¹Удмуртский государственный университет, 426034 Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1

²Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, 426067 Россия, г. Ижевск, ул. Татьяны Барамзиной, 34

Бинарные сплавы на основе алюминия типа Al - ПМ (ПМ - переходный металл) - перспективные материалы для базовых отраслей промышленности [1]. Введение небольших добавок ПМ приводит к повышению коррозионной стойкости, прочности и других механических свойств алюминия [2]. Растворимость данных элементов в алюминии при равновесных условиях небольшая - не превосходит десятых долей процента. Повышение растворимости ПМ в алюминии возможно за счет быстрого ($\sim 10^4$ - 10^6 град/с) охлаждения расплавов, в процессе которого происходит формирование аномально пересыщенных твердых растворов. Дальнейшая термообработка способствует распаду неравновесных твердых растворов с образованием нано-размерных частиц алюминидов ПМ, которые стабилизируют зеренную структуру, обеспечивают повышение физико - механических свойств сплавов [3]. В последнее время в металлургическом производстве все чаще используются экстремальные воздействия на жидкие сплавы, в частности, высокие давления [4]. Экстремальные воздействия влияют и на кинетику и на термодинамику затвердевания расплава. Воздействие высокими давлениями на металлические расплавы с разным исходным состоянием перед охлаждением, совместно с высокоскоростной закалкой расплавов, приводит к получению материалов с уникальными структурами и свойствами [5,6].

Цель работы: изучить особенности формирования структур в бинарных сплавах Al - ПМ (ПМ: Co) при быстром затвердевании их высокотемпературных расплавов под высоким давлением. Выбраны заэвтектические сплавы в области, богатой алюминием.

Лигатуры системы Al - Co составами $Al_{97}Co_3$, $Al_{96}Co_4$, $Al_{95}Co_5$, $Al_{94}Co_6$, $Al_{93}Co_7$ получали в печи Таммана в корундовых тиглях сплавлением чистых компонентов при атмосферном давлении. При выплавке сплавов исходными компонентами служили элементы с содержанием основного металла: алюминий 99.999, кобальт 99.9 масс.%. Первоначально при 1175 К в расплав алюминия вводили кобальт, затем смесь нагревали до 1770 К и перемешивали, подстуживали до 1270 К и выливали в цилиндрическую изложницу из стали, диаметр которой 14 мм. Химический анализ показал, содержание основных компонентов соответствовало заданному составу. Полученные по данной технологии лигатуры рассматривали как исходные образцы.

Образцы после термобарических воздействий и последующей закалке расплава получали в камере высокого давления типа «тороид» [7]. В качестве среды, передающей давление, использовали твердое пластичное вещество -

камень алгетский. Такая среда создавала всестороннее сжатие исследуемого объекта. Основной принцип создания высокого давления в такой камере заключается в сочетании процессов сжатия и истечения вещества, передающего давление. Последовательность эксперимента в камере «тороид»: установление заданного давления, импульсный нагрев, выдержка при установленных давлении и температуре, охлаждение без сброса давления до комнатной температуры и далее уменьшение высокого давления до атмосферного. Образцы для исследования получали под высоким давлением 2, 5, 7, 8 и 10 ГПа. Полуколичественные расчеты, за использованием уравнения теплопроводности, показали, средняя скорость охлаждения расплавов выбранной системы сплавов при данных условиях составляет порядка 1000 град/с. Температура расплава перед закалкой 1800 К (± 10 К).

Рентгеноструктурные и металлографические исследования показали, особенности структур при выбранных условиях затвердевания идентичны для выбранных составов, поэтому достаточно рассмотреть структурообразование для одного состава, возьмем состав $\text{Al}_{95}\text{Co}_5$.

В состав исходного образца $\text{Al}_{95}\text{Co}_5$ (полученного при атмосферном давлении в печи Таммана) входят две стабильные фазы: αAl (твердый раствор кобальта в алюминии, ГЦК, $\text{Fm}\bar{3}\text{m}$) и Al_9Co_2 (моноклинная решетка, $\text{P}2_1/\text{c}$). Данные металлографического анализа - в хорошем согласии с данными рентгеноструктурного анализа. Микроструктура состоит из первичных кристаллов алюминида кобальта Al_9Co_2 , по форме представляющих фрагментированные дендриты, а также эвтектики ($\alpha\text{Al} + \text{Al}_9\text{Co}_2$) пластинчато - игольчатой морфологии с областями веерного расщепления пластинчатого пакета. Средняя толщина интерметаллидов Al_9Co_2 составляет ~ 70 мкм. В образце также присутствуют поры. Повышение скорости охлаждения до 10^3 град/с приводит к измельчению структуры сплава в целом при сохранении фазового состава. Твердость (H_v) интерметаллида Al_9Co_2 составляет порядка 5500 МПа; эвтектики, в зависимости от выбранной области, с бóльшим или меньшим содержанием интерметаллидов, от 230 до 955 МПа. Среднее значение $H_v \sim 1100$ МПа. Усреднение проведено по 20 произвольно выбранным точкам, которые включают H_v интерметаллида и эвтектики.

При быстром затвердевании под высоким давлением 2 ГПа фазовый состав, а также и механизм кристаллизации сплава не изменяются, однако структура, по сравнению с исходным образцом, существенно измельчается. Первичные интерметаллиды Al_9Co_2 представляют собой цепочки длиной и шириной порядка 50 и 2 мкм соответственно из кубиков размером ~ 2 мкм, распределены в объеме образца равномерно. Средняя твердость образца увеличивается до 1200 МПа.

Увеличение давления до 7 - 10 ГПа при прочих равных условиях затвердевания, по отношению к предыдущему образцу, приводит к изменению механизма затвердевания сплава: кристаллизуется по принципу доэвтектического, хотя изначально был заэвтектический. При этом фазовый состав сплава сохраняется, метастабильных фаз не выявлено. В сплаве - первичные кристаллы αAl твердого раствора в форме тонко разветвленных дендритов, хорошо отслеживаются оси первого и второго порядков. Междендритное пространство занимает мелкая пластинчатая эвтектика, размер эвтектических

ячеек ~ 5 мкм. Согласно данным рентгеноспектрального микроанализа, в состав α Al твердого раствора входит 2% Co при затвердевании под давлением 7 ГПа и увеличивается до 3% при затвердевании под давлением 10 ГПа. Известно, что растворимость кобальта в алюминии при эвтектической температуре ~ 0.01 ат.%. Таким образом, с помощью давления можно существенно увеличить степень пересыщения α Al твердой фазы кобальтом. Средняя твердость сплава увеличивается до 1400 МПа при 7 ГПа и до 1500 МПа при 10 ГПа.

Таким образом, увеличение давления оказывает такое же влияние на процессы затвердевания, как если бы увеличивалась скорость охлаждения расплавов, увеличивая их переохлаждение. Одновременно установлено, в области давлений от 5 до 10 ГПа изменения структуры сплавов алюминия с кобальтом очень схожи с изменениями в структуре сплавов алюминия с никелем, количественные и качественные изменения структуры при переходе от одного элемента к другому сравнительно невелики.

Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Центр физических и физико - химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» УдмФИЦ УрО РАН. Выражаем искреннюю признательность Академику РАН, д.ф.-м.н. В.В. Бражкину за содействие в получении образцов в камере типа «тороид» (ИФВД РАН, г. Москва, г. Троицк).

- [1] Inoue A., Kimura H. Fabrications and mechanical properties of bulk amorphous, nanocrystalline, nanoquasicrystalline alloys in aluminum - based system // Journal of Light Metals, 2001. Vol. 1 (1). P. 31.
- [2] Sidorov V.E. et all. Physical properties of Al - R melts // Materials Science and Engineering: A, 2007. Vol. 449 - 451. P. 586.
- [3] Mochugovskiy A.G. et all. Annealing induced precipitation of nanoscale icosahedral quasicrystals in aluminum based alloy // Materials Letters, 2019. Vol. 247. P. 200.
- [4] Menshikova S.G., Brazhkin V.V. Effect of High Pressures on the Formation of New Compounds in the $Al_{86}Ni_2Co_6Gd_6$ Alloy // Physics of the Solid State, 2022. Vol. 64. P. 197.
- [5] Menshikova, S.G. et all. Microstructure and Physical and Mechanical Properties of the $Al_{90}Gd_{10}$ Binary Alloy after Barothermal Treatment // Physics of the Solid State, 2022. Vol. 64. P. 204.
- [6] Chtchelkatchev N.M. et all. Theoretical and experimental study of high - pressure synthesized B20 - type compounds $Mn_{1-x}(Co,Rh)_xGe$ // Pure and Applied Chemistry, 2019. Vol. 91 (6). P. 941.
- [7] Бражкин В.В. Влияние высокого давления на затвердевание металлических расплавов (Pb, In, Cu, двойные сплавы на основе меди): дисс. ... канд. физ. - мат. наук: 01.04.07 / Бражкин Вадим Вениаминович. - М.: МФТИ (1987). 150 с.