

- hexahedral finite element meshes / P. Murdoch, S.E. Benzley, T.D. Blacker, S.A. Mitchel // Finite Elements in Analysis and Design. – 1997. – No. 28. – PP. 137-149.
58. Kaminski M. Hexagonal finite elements in heat conduction / Marcin Kaminski // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2005. – No. 32. – PP. 1143-1151.
59. Benzley S.E. A comparison of all hexagonal and all tetrahedral finite element meshes for elastic and elastic-plastic analysis / S.E. Benzley, E. Perry, K. Merkley, B. Clark, G. Sjaardema // Proc. 4th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1995. – PP. 179-192.
60. Sukachev E.A. Sotovye seti radiosvyazi s podvizhnymi ob'ektami: ucheb. posob. / E.A. Sukachev. – [3-e izd., pererab. i dopoln.]. – Odessa : ONAS im. A.S. Popova, 2013. – 256 p.

УДК 669.71:669.058:539.24'25

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ В СПЛАВАХ СИСТЕМЫ AL-CU-CO

Танцюра И. В., к. ф.-м. н.

*Запорожский национальный университет,
ул. Жуковского, 66, г. Запорожье, 69600, Украина*

taniv14@gmail.com

Исследовали структурно-фазовое состояние сплава $Al_{65,5}Cu_{18}Co_{16,5}$, полученного методом зонно-тигельной плавки. Установлено существование гетерофазной структуры, в состав которой входит квазикристаллическая фаза. Основу структуры сплава составляют декагональная и моноклинная фазы, которые имели пластинчатое строение и в которых фиксировали максимальное значение микротвердости ~ 11 ГПа.

Ключевые слова: декагональная фаза, квазикристалл, микротвердость, дендрит, перитектическая реакция.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ У СПЛАВАХ СИСТЕМИ Al-Cu-Co

Танцюра І. В., к. ф.-м. н.

*Запорізький національний університет,
вул. Жуковського, 66, м. Запоріжжя, 69600, Україна*

taniv14@gmail.com

Досліджено структурно-фазовий стан сплаву $Al_{65,5}Cu_{18}Co_{16,5}$, одержаного методом зонно-тигельного плавлення. Встановлено існування гетерофазної структури, до складу якої входить квазікристалічна фаза. Основу структури сплаву складають декагональна та моноклінна фази, які мали пластинчасту будову і в яких фіксували максимальне значення микротвердості ~ 11 ГПа.

Ключові слова: декагональна фаза, квазікристал, микротвердість, дендрит, перитектична реакція.

SINGULARITY STRUCTURE FORMATION OF THE ALLOY SYSTEM Al-Cu-Co

Tantsura I. V., Ph.D. in Physics and Maths

*Zaporizhzhya National University,
Zhukovsky str., 66, Zaporizhzhya, 69600, Ukraine*

taniv14@gmail.com

Discovery of a wide class of alloys with an unconventional structure, which were called quasicrystalline, gave rise to the development of new conceptions on the structure of substance both in the field of crystallography and solid physics on the whole. The presence of symmetry axes of the fifth, eighth, tenth, and twelfth orders in the diffraction patterns of these materials stimulated the development of crystallography of such spaces where the above-indicated axes are possible if a translation symmetry takes place. The high hardness in combination with a low friction coefficient makes it

possible to employ them in machine units with high requirements to wear resistance. A large number of studies have been carried out to discover new stable icosahedral (*i*-) and decagonal (*d*-) quasicrystals and to clarify atomic structures and physical properties. For the Al-TM system, a number of stable *i*- and *d*-quasicrystals were discovered in Al-Cu-TM (TM=Fe, Ru, Os), Al-Pd-TM (TM=Mn or Re), and Al-Co-TM (TM=Ni or Cu) systems.

Since the discovery of Al-Cu-Co stable-decagonal quasicrystalline phase, several investigations have been conducted to explore the phase stability. Among all alloy systems in which *D-phase* has been found, the Al-Cu-Co is one of the easiest alloy systems to form stable *D-phase* by the slow-cooling method. As is well known, the slow-cooling method is not suitable for preparing bulk single crystals because one cannot control spontaneous nucleation during solidification. For example, it has been demonstrated that *D-phase* transforms to crystalline phases for different processing conditions, for example annealing temperature and high-energy ball milling. According to the phase equilibrium diagram the *D-phase* is stable up to at least 1000°C. Several alloy compositions indicate that the *D-phase* is formed by a peritectic reaction between the *AlCo* phase and the liquid. These investigations suggest that the *AlCo* phase has an important role on the formation of the *D-AlCuCo* phase. Therefore, the aim is to establish the possibility of obtaining a quasicrystalline decagonal phase in the Al-Cu-Co by zone melting crucible.

The nominal composition of Al₆₅Cu_{17,5}Co_{17,5} alloy was prepared by zone melting crucible and solidified by cooling in water. High purity elements of Al, Co and Cu were used. The structure and phase composition of the alloy was studied by X-ray diffraction (DRON-3M, Co-K α – radiation), spectral analysis (SpectroMax), scanning electron microscopy (JSM 6360LA), and metallography (Axio Imager A1m/M1m). The microhardness distribution over the depth of the laser-affected zone was determined using a PMT-3 device.

According to the X-ray diffraction data, to formation of a *D-фазы*, Al₁₃Co₄, Al₂Cu in the surface layers of Al_{65,5}Cu₁₈Co_{16,5} alloy. The formation of heterogeneous structure in the alloy was established, one of the structure components is quasi-crystalline *D-phase*, that resulting in a significant increase of microhardness. The microhardness of alloy system was *D-phase* – 11 GPa, Al₁₃Co₄ – 7 GPa, Al₂Cu – 3 GPa.

Key words: decagonal phase, quasicrystalline, microhardness, dendrite, peritectic reaction.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих металлических системах было обнаружено формирование квазикристаллических фаз икосаэдрической или декагональной симметрии, которые являются стабильными при высоких температурах. На сегодня открыт целый ряд систем, сплавы которых содержат в себе квазикристаллическую фазу декагональной симметрии. С точки зрения практического использования перспективной является система Al-Cu-Co, поскольку, во-первых, декагональная фаза (*D-фаза*) в этой системе стабильная, а во-вторых, ее получение возможно с помощью ряда методов: Бриджмена [1], Чохральского [2], быстрой кристаллизации [3] и других. Несмотря на наличие широкого ряда методов получения, все еще остается открытым вопрос об области гомогенности и механизме получения *D-фазы*. Кроме того, в литературе отсутствуют данные о возможности получения квазикристаллического сплава методом зонной тигельной плавки. Поэтому целью работы является установление возможности получения квазикристаллической декагональной фазы в системе Al-Cu-Co методом зонной тигельной плавки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования был выбран сплав системы Al-Cu-Co, в состав которого входили Al (65 ат.%), Cu (17,5 ат.%), Co (17,5 ат.%). Сплав был получен из чистых элементов (99,99%) методом зонно-тигельной плавки в индукционной печи с водоохлаждающим поддоном.

Химический состав полученного сплава контролировали с помощью спектрального анализа (SpectroMax). Структурно-фазовый состав исследовали с помощью рентгеновского (ДРОН-3М, Co-K α – излучение), металлографического (Axio Imager A1m/M1m) и электронно-микроскопического (JSM 6360LA), дюриметрического (ПМТ-3) анализов. При идентификации *D-фазы* применяли методику, предложенную в [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из анализа изотермического разреза тройной диаграммы состояния Al-Cu-Co при 873 К [5] сплав Al₆₅Cu_{17,5}Co_{17,5} должен быть однофазным квазикристаллическим. С помощью спектрального анализа было установлено, что химический состав литого сплава несколько отличался по составу от состава исходной шихты и соответствовал Al (65,5 ат.%), Cu (18,5 ат.%), Co (16 ат. %). Это, очевидно, связано с тем, что в использованном методе

были недостаточные температуры для полного расплавления кобальта. Доказательством этого может быть существование некоторого числа спекшихся частичек, обогащенных кобальтом. Подобное изменение химического состава, согласно диаграмме состояния [5], должно привести к формированию не однофазного, а трехфазного сплава с преобладанием декагональной *D-фазы*. При этом, в равновесии с *D-фазой* при указанной температуре должны находиться стабильные интерметаллические фазы $Al_{13}Co_4$ и Al_9Co_2 .

Рентгенографически установлено (рис. 1), что исходная структура литого сплава действительно была трехфазной, но состояла из *D-фазы*, моноклинной $Al_{13}Co_4$ и тетрагональной Al_2Cu .

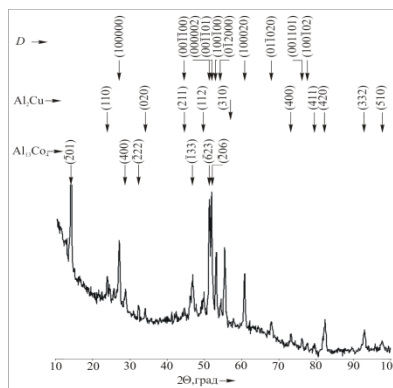
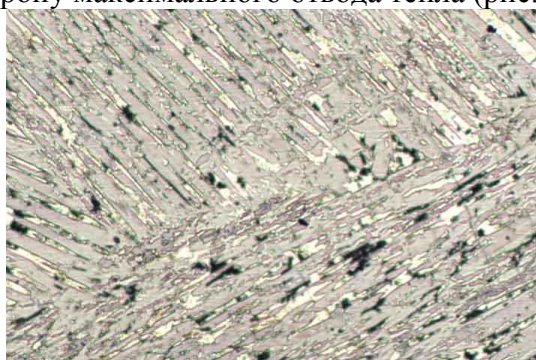
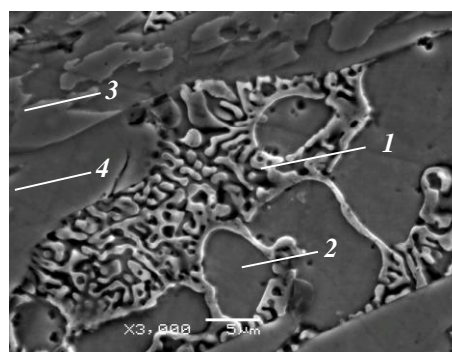


Рис. 1. Дифраграмма от поверхности образцов сплава $Al_{65.5}Cu_{18}Co_{16.5}$

Подобное изменение фазового состава находит объяснение при детальном изучении структуры сплава. Согласно данным металлографического анализа большую часть сплава составляли кристаллы с дендритной формой роста и ярко выраженной анизотропией роста в сторону максимального отвода тепла (рис. 2, а).



а



б

Рис. 2. Исходная микроструктура сплава $Al_{65.5}Cu_{18}Co_{16.5}$ x75 (а), x3000(б): 1-4 – участки, в которых проводили химический анализ

Исследование структуры литого сплава было проведено с помощью локального микрорентгеноспектрального анализа. Химический состав фаз определяли безэталонным методом с учетом поправочных коэффициентов отражения электронов зонда, поглощения характеристического рентгеновского излучения и флуоресценции. Анализируя данные электронной микроскопии, было установлено, что исходная структура литого сплава была гетерофазной. Высокая разрешающая способность метода и химический анализ фазовых составляющих литого сплава позволили установить особенности формирования и морфологию выявленных фаз (табл. 1). *D-фаза* имела дендритную форму роста (рис. 2, б, участок 2), на которой, как на подложке, формировалась моноклинная $Al_{13}Co_4$ фаза с кристаллами неправильной формы роста (рис. 2, б, участок 3). В межфазном пространстве кристаллизовались тетрагональная фаза Al_2Cu с пластинчатой морфологией (рис. 2, б, участок 4) и эвтектика $Al_2Cu + Al$ (рис. 2, б). Необходимо отметить, что химический состав (табл. 1) двойных интерметаллических фаз значительно отличался от равновесной стехиометрии, что связано, очевидно, с неравновесными условиями кристаллизации.

Таблица 1 – Химический состав участков, обозначенных на рис. 2, б

Участок	Химический состав, ат%			Предполагаемые фазы
	Al	Co	Cu	
1	83	2	15	$Al + Al_2Cu$
2	59	3	38	Al_2Cu
3	63	30	7	$Al_{13}Co_4$
4	58	22	20	<i>D-фаза</i>

Размеры структурных составляющих в литом сплаве позволили установить значение микротвердости в каждой фазе, что также косвенно указывало на корректную идентификацию присутствующих фаз в сплаве. Основу структуры сплава в литом состоянии составляла *D-фаза* с максимальным значением микротвердости ~ 11 ГПа, что согласуется с данными работы [2]. Микротвердость фаз $Al_{13}Co_4$ и Al_2Cu составляла 7 ГПа и 3 ГПа, соответственно.

Анализируя полученные экспериментальные данные и сопоставляя их с литературными [5], можно сделать предположения о процессе структурообразования в сплаве системы Al-Cu-Co, полученном методом зонно-тигельной плавки вблизи области гомогенности *D-фазы*. По характеру сформировавшейся структуры можно сказать, что в первую очередь из расплава кристаллизуется высокотемпературная фаза $Al_{13}Co_4$. В дальнейшем, по перитектической реакции формируется квазикристаллическая *D-фаза*. Поскольку температура формирования фазы Al_2Cu составляет ~ 700 К, то в межфазном пространстве декагональной и моноклинной фаз формируется тетрагональная фаза Al_2Cu и эвтектика $Al+Al_2Cu$.

В связи с неравномерным распределением кобальта, в полученном сплаве не сформировалась фаза его содержащая Al_9Co_2 , которая расположена вблизи области гомогенности *D-фазы*.

ВЫВОДЫ

Установлена возможность формирования квазикристаллической фазы в сплаве $Al_{65,5}Cu_{18}Co_{16,5}$, полученном методом зонно-тигельной плавки.

Показано, что в сплаве системы *Al-Cu-Co* формируется гетерогенная структура, в состав которой наряду с квазикристаллической *D-фазой* входят фазы $Al_{13}Co_4$ и Al_2Cu .

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang L. M. Solidification study of Al-Co-Cu alloys using the Bridgman method / L. M. Zhang, P. Gille // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2004. — V. 370. — P. 198-205.
2. Bogdanowicz W. Two-subgrain single quasicrystals Al-Cu-Co alloy growth and characterisation / W. Bogdanowicz // *Journal of Crystal Growth*. — 2002. — V. 240. — P. 255-266.
3. Liu X. B. Decagonal quasicrystal formed directly from the rapidly solidified $Al_{66}Cu_{17}Co_{17}$ alloy / X. B. Liu, G. C. Yang, J. F. Fan, G. S. Song // *Journal of materials science letters*. — 2003. — V. 22. — P. 103-105.
4. Girzhon V. V. Modeling of decagonal quasicrystal lattice / V. V. Girzhon, V. M. Kovalyova, O. V. Smolyakov and M. I. Zakharenko // *Journal of Non-Crystalline Solids*. — 2012. — V. 358. — P. 137-144.
5. Raghavan V. Al-Cu-Mg-Si (Aluminum-Copper-Magnesium-Silicon) / V. Raghavan // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. — 2007. — V. 28, №2. — P. 211-212.

REFERENCES

1. Zhang, L.M. and Gille, P. (2004), "Solidification study of Al-Co-Cu alloys using the Bridgman method", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 370, pp. 198-205.
2. Bogdanowicz, W. (2002), "Two-subgrain single quasicrystals Al-Cu-Co alloy growth and characterisation", *Journal of Crystal Growth*, vol. 240, pp. 255-266.

3. Liu, X.B., Yang, G.C., Fan, J.F. and Song, G.S. (2003), "Decagonal quasicrystal formed directly from the rapidly solidified Al₆₆Cu₁₇Co₁₇ alloy", *Journal of materials science letters*, vol. 22, pp. 103-105.
4. Girzhon, V.V., Kovalyova, V.M., Smolyakov, O.V. and Zakharenko, M.I. (2012), "Modeling of decagonal quasicrystal lattice", *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 358, pp. 137-144.
5. Raghavan, V. (2007), "Al-Cu-Mg-Si (Aluminum-Copper-Magnesium-Silicon)", *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, vol. 28, no. 2, pp. 211-212.

УДК 517.9

МОДЕЛЮВАННЯ НЕПЕРЕРВНОГО ПЕРІОДИЧНОГО РОЗВ'ЯЗКУ ХВИЛЬОВОГО РІВНЯННЯ

Хома-Могильська С. Г., к. ф.-м. н.

*Тернопільський національний економічний університет,
вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, 46020, Україна*

sv_khoma@ukr.net

Наведено нову схему дослідження розв'язків крайової періодичної задачі для неоднорідного хвильового рівняння $u_{tt} - u_{xx} = f(x, t)$. Побудовано неперервний розв'язок хвильового рівняння у прямокутнику $[0, \pi] \times [0, 2\pi]$. Встановлено умови існування 2π -періодичних за часовою змінною розв'язків хвильового неоднорідного рівняння з нульовими крайовими умовами за змінною x у класі узагальнених розв'язків.

Ключові слова: хвильове рівняння, неперервний розв'язок, періодичний розв'язок, крайові умови.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ

Хома-Могильская С. Г., к. ф.-м. н.

*Тернопольский национальный экономический университет,
ул. Львовская, 11, г. Тернополь, 46020, Украина*

sv_khoma@ukr.net

Приведена новая схема исследования решений краевой периодической задачи для неоднородного волнового уравнения $u_{tt} - u_{xx} = f(x, t)$. Построено непрерывное решение волнового уравнения в прямоугольнике $[0, \pi] \times [0, 2\pi]$. Установлены условия существования 2π -периодических по временной переменной решений волнового неоднородного уравнения с нулевыми краевыми условиями по переменной x в классе обобщенных решений.

Ключевые слова: волновое уравнение, непрерывное решение, периодическое решение, краевые условия.

MODELING OF UNINTERRUPTED PERIODIC SOLUTION OF WAVE EQUATION

Homa-Mogyl's'ka S. G., k. f.-m. n.

*Ternopil National Economic University,
Str. L'vivs'ka, 11, Ternopil, 46020, Ukraine*

sv_khoma@ukr.net

The theory of differential equations in partial derivatives is developing the fastest today. Essential differences are characterized to different types of differential equations (elliptic, parabolic and hyperbolic). Each type of such equations has significantly different characteristics in construction of problem solution: the Cauchy problem, mixed problem, boundary-value problem. The need to research of hyperbolic equations is due to the needs of applied nature. Indeed hyperbolic equations describe many physical operations such as the wave processes, oscillating characteristics of radio-electronic circuits, the movement of liquids and gases in certain circumstances. A large number of problems of celestial mechanics are reduced to solving equations of this type.