

СТРУКТУРА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Ti–Al–Nb–Cr

В.А. Костин, Г.М. Григоренко

ІЭС ім. Е.О. Патона НАН України. 03150, г. Київ, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены сплавы на основе алюминидов титана, которые являются современными перспективными материалами для изготовления деталей и механизмов в судо-, машиностроении, авиационной и космической технике. Основным способом получения качественных слитков интерметаллидов на основе системы Ti–Al является электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью. Изучены структура и свойства интерметаллидного сплава системы Ti–Al–Nb–Cr и построена расчетная равновесная диаграмма состояния. Показано, что в центральной части слитка структура сплава состоит примерно из 85...90 об. % ($\gamma + \alpha_2$)-фазы, массивных участков γ -фазы около 10 об. %, а также небольшой доли в 3...5 об. % кубической B2-фазы, расположенной по границам зерен. На основе методологии CALPHAD построены равновесные трехкомпонентные диаграммы состояния систем Ti–Al–Nb–Cr. Библиогр. 15, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: титановые сплавы; электронно-лучевая плавка; интерметаллиды; алюминиды титана; фазовые превращения; тройные диаграммы состояния

Одной из актуальных проблем современного материаловедения является разработка и создание новых конструкционных материалов, а также эффективных способов их производства и соединения.

Первостепенная роль в решении этой задачи принадлежит созданию новых жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов, которые являются основными конструкционными материалами для многих ведущих отраслей промышленности (машино-, турбостроения, авиационной и космической техники, химической, энергетической и др.).

Жаростойкие и жаропрочные сплавы обладают высоким комплексом свойств, что определяет их применение в качестве конструкционных материалов для изготовления изделий, имеющих повышенную механическую прочность и коррозионную стойкость.

К настоящему времени разработано и широко используется большое количество жаропрочных сплавов, которые работают в широком диапазоне температур. Вместе с тем проблема создания новых легких жаропрочных сплавов, температура рабочей среды которых превышает 550...600 °С, особенно актуальна, поскольку технические характеристики обычных сталей и сплавов заметно снижаются в этих условиях.

Анализ литературных данных показывает, что для решения этой проблемы целесообразно использовать сплавы на основе интерметаллидов титана. Алюминиды титана обладают высокими прочностью, модулем упругости, жаропрочностью и жаростойкостью, антикоррозионными

свойствами, сопротивлением усталостному разрушению и ползучести [1, 2].

Однако широкому промышленному применению сплавов на основе алюминидов титана препятствует их низкая пластичность и повышенная хрупкость в процессе обработки [3]. Термомеханическая обработка (ТМО) в ($\gamma + \alpha_2$)-области приводит к измельчению и формированию дисперсной глобулярной структуры, которая, однако, показывает незначительное улучшение пластичности и повышение прочности сплава.

Улучшение технологических свойств сплавов на основе интерметаллидов титана может быть обеспечено за счет их легирования такими элементами, как хром, молибден, ниобий, которые могут в значительной мере изменить их структурно-фазовое состояние и как следствие, обеспечить требуемый комплекс теплофизических и механических свойств.

Цель данной работы — построение расчетной равновесной диаграммы состояния интерметаллидного сплава системы Ti–Al–Nb–Cr, изучение его микроструктуры и свойств для оптимизации параметров электронно-лучевой плавки и обеспечения высоких свойств сплава.

Методика исследований. Среди современных способов специальной электрометаллургии электронно-лучевая плавка (ЭЛП) является наиболее эффективной в вакуумной металлургии [4, 5], которая нашла широкое применение в промышленности для получения тугоплавких и высокоактивных сплавов со сверхнизким содержанием газов, летучих примесей и неметаллических включений. ЭЛП позволяет в широких пределах регулировать скорость плавления слитка, управлять его неоднородностью по глубине, влиять на процессы кристаллизации жидкого металла. При-

В.А. Костин — <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>

© В.А. Костин, Г.М. Григоренко, 2019

менение промежуточной емкости при электронно-лучевой плавке способствует рафинированию, удалению неметаллических включений, усреднению состава и свойств сплава по сечению [6].

В Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины для проведения научно-исследовательских работ по изучению металлургических процессов в вакууме, совершенствования существующих и разработки новых технологических процессов используется электронно-лучевая установка УЭ-208М [7].

Способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью выплавлен слиток диаметром 165 мм системы Ti–Al–Nb–Cr. Содержание легирующих элементов в слитке определяли атомно-эмиссионным спектрометром с индуктивно связанной плазмой ICAP 6500 DUO (Thermo Scientific, США). Результаты химического состава металла слитка показали неравномерное распределение легирующих элементов по его длине (табл. 1). Максимальное отклонение содержания элементов не превышает, мас. %: 1,5 по алюминию, 0,6 по ниобию, 0,2 по хрому.

Методом растровой электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе JSM 840 (JEOL, Япония), оснащенный микроанализатором Link 860/500 (Link Analytical, Англия), изучена структура и проведен анализ структурных составляющих интерметаллидного сплава, полученного электронно-лучевой плавкой.

Механические испытания на одноосное растяжение/сжатие образцов интерметаллидного сплава проводили на сервогидравлической машине «INSTRON-1251». Растяжение образцов происходило со скоростью деформации $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

В связи с тем, что интерметаллидный сплав при комнатной температуре малопластичен ($\epsilon < 3 \%$), то для определения его механических свойств проводили испытание на одноосное сжатие.

Результаты исследований и их обсуждение. Металлографические исследования микроструктуры слитка показали (рис. 1), что кристаллизация слитка проходит преимущественно в направле-

Таблица 1. Распределение легирующих элементов по длине слитка интерметаллидного сплава системы Ti–Al–Nb–Cr, мас. %

Место отбора проб	Al	Nb	Cr	Ti
Верх	36,6	7,6	2,0	Основа
Середина	37,2	7,5	2,1	
Низ	39,5	7,2	2,2	

нии обратном направлению отвода тепла. Микроструктура в верхней части слитка в основном состоит из колоний ламелей ($\gamma + \alpha_2$)-фазы (рис. 1, а), которые направлены по оси слитка. Колонии ламелей разделяются участками массивной γ -фазы, а также расположенной по границам зерен упорядоченной β_0 (B2)-фазой.

В средней части слитка структура сплава в основном повторяет структуру верхней части (рис. 1, б), но размер участков с γ -фазой несколько больше. Кроме того, на рисунке хорошо видна межламельная прослойка β_0 (B2)-фазы. Структура нижней части слитка также состоит из двойниковых ламелей ($\gamma + \alpha_2$)-фазы (рис. 1, в). По границам ламельных колоний выявляются следы B2-фазы. Зерна разделены между собой остатками γ -фазы.

Анализ распределения микроструктурных составляющих в объеме сплава показал: в верхней части слитка ламельная структура ($\gamma + \alpha_2$) занимает приблизительно 70...80 об. %; примерно 10...15 % от общего объема занимают участки массивной γ -фазы, а доля β -Ti (B2-фаза), расположенной по границам зерен составляет около 7...10 об. %; в центральной части слитка структура сплава состоит приблизительно из 85...90 % объема колоний ламелей ($\gamma + \alpha_2$)-фазы, участков γ -фазы около 10 об. %, а также небольшой доли (до 3...5 об. %) остаточной кубической B2-фазы, расположенной на границах; микроструктура нижней части слитка состоит преимущественно из двойниковых колоний ламелей ($\gamma + \alpha_2$)-фазы, по границам которых располагается γ -фаза (менее 5 об. %), а также незначительного количества участков B2-фазы.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа слитка показали (табл. 2) неравномерный ха-

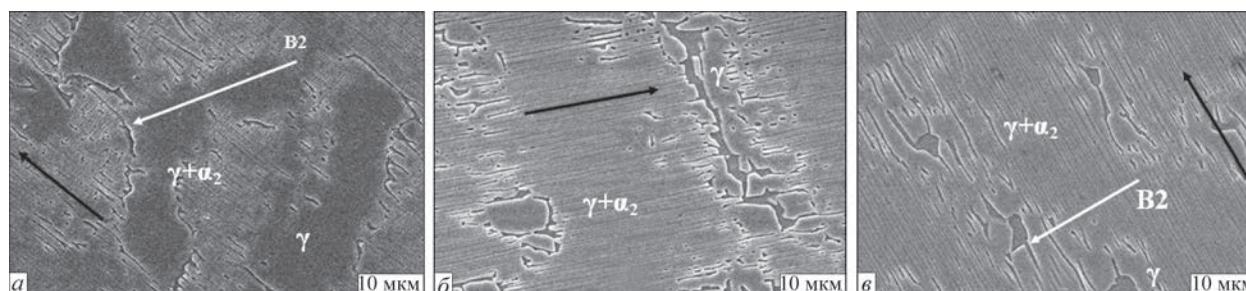


Рис. 1. Микроструктура интерметаллидного сплава Ti–38Al–7Nb–2Cr в различных участках слитка: а — верх; б — середина; в — низ; черная стрелка — направление кристаллизации

Таблиця 2. Содержание легирующих элементов в характерных участках интерметаллидного сплава Ti–38Al–7Nb–2Cr, ат. %

Фаза	Ti	Al	Nb	Cr
$\gamma+\alpha_2$	49,81	39,32	3,51	7,36
γ	56,37	37,54	4,11	1,99
B2	54,85	36,13	7,06	1,98

рактически равномерное распределение легирующих элементов по его длине, в т.ч. ниобия, который в значительной мере влияет на образование кубической B2-фазы и хрома, повышение содержания которого приводит к охрупчиванию сплава.

Фрактографические исследования разрушенных после испытаний на сжатие образцов интерметаллидного сплава Ti–38Al–7Nb–2Cr, полученного способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью показали, что характер разрушения образцов смешанный. В основном формируется транскристаллитный рыхлый излом по механизму микроскола, характерному для хрупкого типа разрушения (рис. 2, а). На поверхности излома наблюдаются отдельные элементы вязкого разрушения — светлые волнистые гребни отрыва, указывающие на незначительную пластичность. Помимо этого в изломе наблюдаются микропоры. Механизм микроскола в сочетании с образованием микропор является характерным механизмом разрушения α_2 - и $(\gamma+\alpha_2)$ -титановых сплавов. На рис. 2, б представлен участок излома, состоящего из ряда пластинчатых ступенек параллельных друг другу. Такой излом характерен для хрупкого разрушения интерметаллида Ti_3Al по игольчатым пластинкам α_2 -фазы.

Результаты механических испытаний на сжатие при комнатной температуре образцов сплава Ti–38Al–7Nb–2Cr, полученного способом ЭЛП, показали, что предел прочности (σ_b) вырезанных из различных участков слитка изменяется приблизительно на 30 % (с 1400 до 1800 МПа), предел текучести ($\sigma_{0,2}$) — на 13 % (с 477 до 540 МПа), а

относительно удлинение (δ) увеличивается с 19 до 23 %. Повышение механических свойств в нижней части слитка связано с образованием в этом участке дуплексной микроструктуры — ламелярной $(\gamma + \alpha_2)$ -фазы и гранулярной γ -фазы.

Дальнейшее повышение механических свойств интерметаллидных сплавов должно идти по пути оптимизации его структурного состояния. Анализ сплавов на основе системы Ti–Al показал, что в зависимости от количества β -стабилизаторов их структурно-фазовый состав и свойства могут заметно изменяться.

Из работы [8] видно, что сплавы, содержащие более 51 ат. % алюминия (т. н. однофазные γ -сплавы) — малопрочные и малопластичные, а менее 51 ат. % алюминия — двухфазные γ -сплавы. В качестве второй фазы образуется соединение Ti_3Al , количество которой составляет 5 об. % при 50 ат. % алюминия и 25 об. % при 47 ат. % алюминия.

Целесообразно создавать двухфазные γ -сплавы, в структуре которых присутствует от 10 до 15 об. % α_2 -фазы с тонкопластинчатой структурой. Такие сплавы обладают высокими механическими свойствами: $\sigma_b = 520...480$ МПа и $\delta_5 = 2,5...3,0$ % при температуре испытаний +20 °С. Наибольшее повышение механических свойств γ -сплавов достигается за счет снижения содержания алюминия до 45...48 ат. % и легирования сплавов тугоплавкими элементами (Nb, W, Mo) до 10 ат. %.

Перспективным представляется легирование интерметаллида титана Ti_3Al свыше 10 ат. % ниобием, в результате чего в структуре сплавов будет формироваться упорядоченная орторомбическая фаза Ti_2AlNb орто-фаза. Легирование орто-фазы ванадием способствует повышению низкотемпературных прочностных и пластических свойств сплава, а легирование цирконием, молибденом и кремнием повышает его жаропрочные свойства и стойкость к окислению.

Одним из путей решения этой задачи является использование диаграммы состояния си-

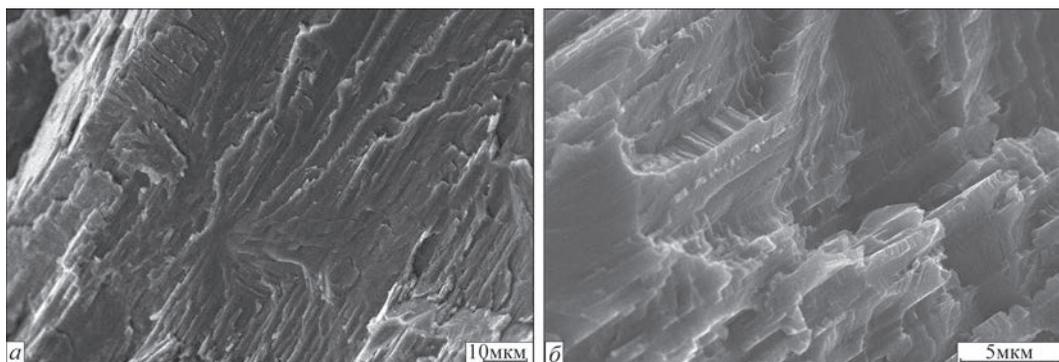


Рис. 2. Характер разрушения интерметаллидного сплава Ti–38Al–7Nb–2Cr: а — рыхлый излом; б — разрушение по пластинкам α_2 -фазы

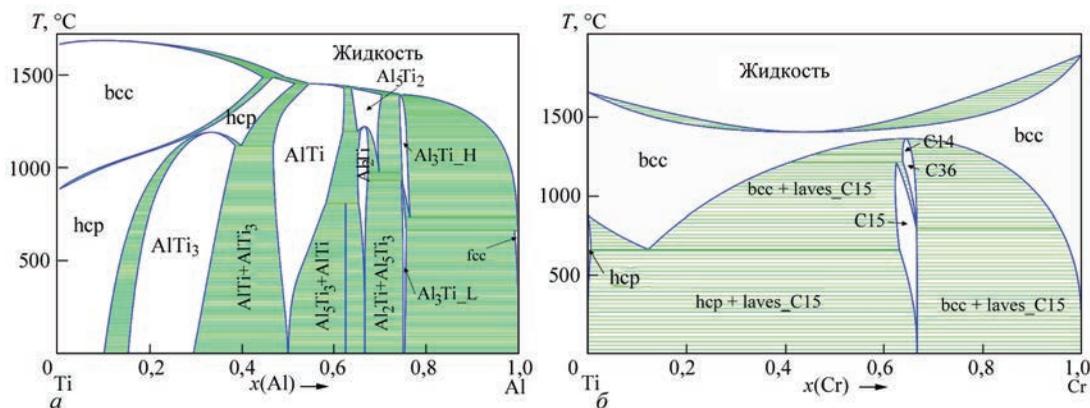


Рис. 3. Расчетные бинарные диаграммы состояния системы Al–Cr–Nb–Ti: а — подсистема Al–Ti; б — Cr–Ti

системы Ti–Al–Nb–Cr. Прямое экспериментальное построение диаграммы состояния системы Ti–Al–Nb–Cr является достаточно длительным и дорогостоящим процессом, поэтому в работе было решено воспользоваться существующими компьютерными моделями [9, 10]. Одним из основных подходов для расчета равновесных диаграмм состояния является метод CALPHAD (Calculation of PHase Diagrams) [11].

Метод CALPHAD основан на анализе экспериментальной информации о фазовых равновесиях в системе и термодинамических свойствах фаз ее составляющих. Термодинамические свойства каждой фазы описываются математической моделью, параметры которой вычисляются путем минимизации разности между расчетной величиной свободной энергии Гиббса и ее экспериментальным значением, учитывая все сосуществующие фазы. После каждого приближения проводится пересчет фазовой диаграммы и термодинамических свойств составляющих систему фаз.

В настоящее время предложено ряд математических программ, основанных на методе CALPHAD, которые используются для расчета различных типов фаз, создан набор термодинамических баз данных для различных материалов — сталей, титановых сплавов, интерметаллидных соединений и др.

В работе для построения диаграммы состояния системы Ti–Al–Nb–Cr применили программу PANDAT (CompuTherm LLC, США). Для построения диаграммы состояния использовали термодинамическую базу данных титановых сплавов, представленную в программе MatCalc (mc_sample_ti.002.tdb). Эта база содержит подборку опубликованных термодинамических данных для сплавов на основе Ti и алюминидов титана, а также данные, которые были рассчитаны проф. Erwin Povoden-Karadeniz [12].

Система Al–Cr–Nb–Ti содержит шесть двухкомпонентных систем (Al–Cr, Al–Nb, Al–Ti, Cr–Nb, Cr–Ti, Nb–Ti) и четыре трехкомпонентных системы (Al–Nb–Ti, Al–Cr–Ti, Cr–Nb–Ti и Al–Cr–Nb). Термодинамическая база данных для этой четырехкомпонентной системы построена на основе ее двойных и тройных систем.

Термодинамическое описание двойной системы Al–Ti имеет важное значение для полного описания термодинамики всей системы Al–Cr–Nb–Ti. Диаграмма состояния подсистемы Al–Ti содержит одиннадцать фаз. Максимальная растворимость Al в β -Ti составляет 44,6 ат. % при температуре перитектического превращения 1491 °C (Ж + ОЦК(β) \leftrightarrow ГПУ (α)). Максимальная растворимость Al в α -Ti составляет 51,5 ат. % при перитектической температуре 1456 °C (Ж + ГПУ(α) \leftrightarrow AlTi).

Двойная подсистема Cr–Ti содержит стабильные фазы — жидкость, ОЦК, ГПУ и три политипа фаз Лавеса — C14, C15 и C36. Термодинамическое описание подсистем Nb–Ti, Al–Cr, Al–Nb и Cr–Nb представлены в работах [13–15]. На рис. 3 приведены расчетные диаграммы состояния систем Al–Ti и Cr–Ti.

Трехкомпонентная подсистема Al–Nb–Ti содержит фазы твердых растворов на основе алюминия, титана и ниобия, двойные фазы этих компонентов и три тройные фазы: Ti_2AlNb (O1), Ti_2AlNb (O2) и Ti_4NbAl_3 . Орторомбические фазы Ti_2AlNb (O1) и Ti_2AlNb (O2) имеют одинаковую пространственную группу *Smct*, обозначение *oC16*, но немного различный состав: $(Al, Nb, Ti)_{0,75}(Al, Nb, Ti)_{0,25}$ и $(Al, Nb, Ti)_{0,5}(Al, Nb, Ti)_{0,25}(Al, Nb, Ti)_{0,25}$.

В подсистеме Cr–Nb–Ti присутствуют: фаза твердого раствора Nb в α -Ti, фазы Лавеса кубического типа C15 (пространственная группа *Fd3m*, 24 атома в элементарной ячейке) состава $(Al, Cr, Nb, Ti)_2 (Al, Cr, Nb, Ti)_1$ и гексагонального типа C36 (пространственная группа *P6₃/mmc*, 24 атома в элементарной ячейке) состава $(Al, Cr, Nb, Ti)_2 (Al, Cr, Nb, Ti)_1$.

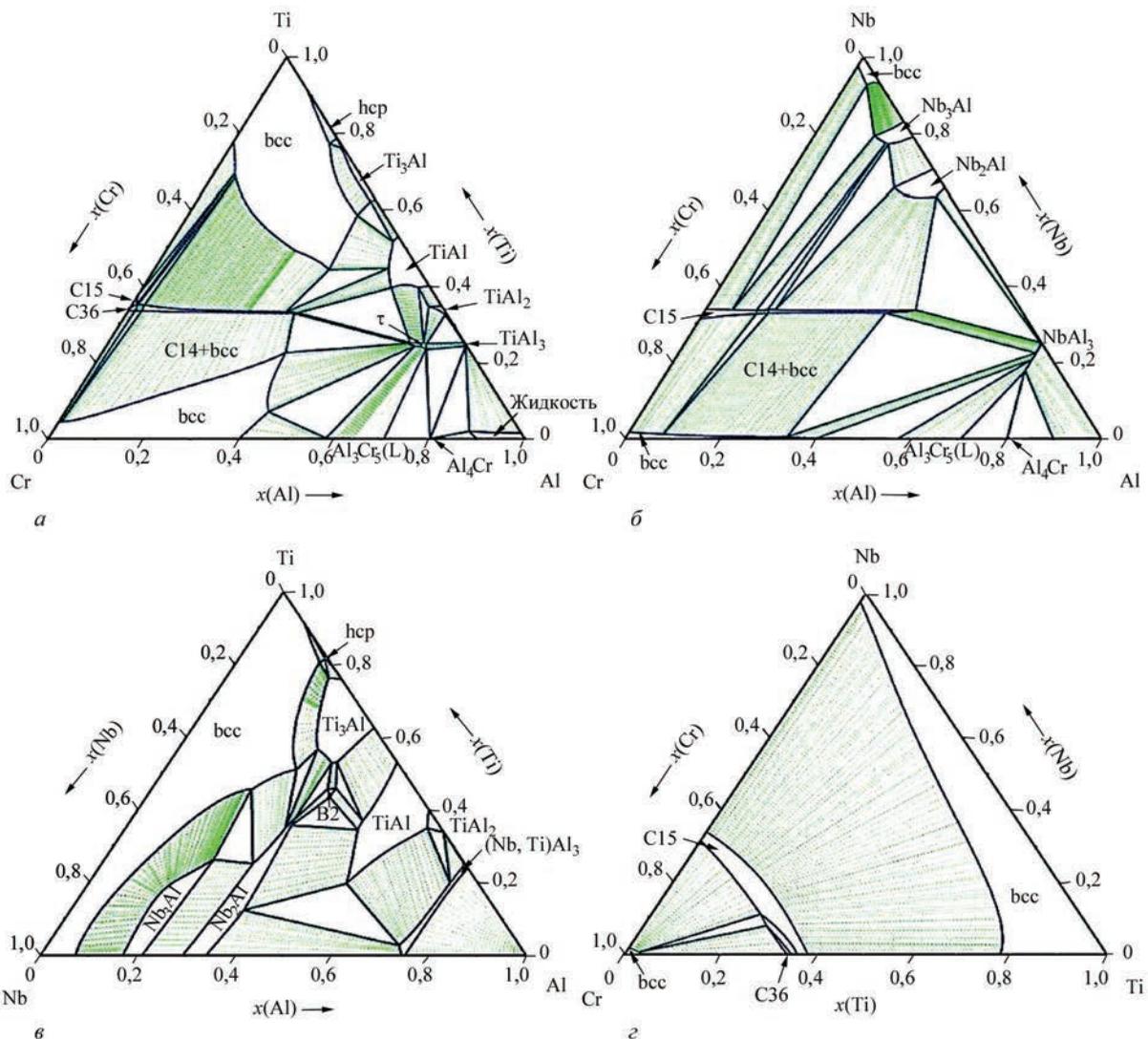


Рис. 4. Расчетные изотермические сечения тройных фазовых диаграмм системы Ti–Al–Nb–Cr при температуре 1000 °C: а — Ti–Al–Cr; б — Nb–Al–Cr; в — Ti–Al–Nb; г — Nb–Ti–Cr

На рис. 4 представлены рассчитанные для 1000 °C изотермические сечения систем Al–Nb–Ti, Cr–Nb–Ti, Al–Cr–Ti, Al–Cr–Nb.

Объединяя двух- и трехкомпонентные системы, фазовое равновесие в системе Ti–Al–Nb–Cr может быть рассчитано путем экстраполяции температур и концентраций. Содержание Al в значительной степени влияет на расположение и тип фаз в исследуемом сплаве. Например, уменьшение содержания алюминия с 48 до 46 ат. % значительно увеличит двухфазное поле TiAl + Ti₃Al. Когда содержание алюминия составляет 46 ат. %, а содержание Nb — 7 ат. % добавление хрома будет сужать температурный диапазон двухфазной области TiAl + Ti₃Al. При добавлении хрома больше 3 ат. % двухфазная область TiAl + Ti₃Al исчезает. Увеличение содержания хрома будет способствовать формированию фаз Лавеса.

Выводы

1. Изучена структура и механические свойства интерметаллидного сплава системы Ti–38Al–7Nb–2Cr. Показано, что в центральной части слитка структура сплава состоит примерно из 85...90 об. % ($\gamma+\alpha_2$)-фазы, массивных участков γ -фазы около 10 об. %, а также небольшой доли до 3...5 об. % кубической B2-фазы, расположенной по границам зерен.

2. На основе метода CALPHAD построены трехкомпонентные диаграммы состояния системы Ti–Al–Nb–Cr.

3. Представленные диаграммы состояния системы Ti–Al–Nb–Cr могут быть использованы для оптимизации параметров электронно-лучевой плавки и обеспечения высоких свойств титанового сплава.

Список літератури

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Справочник. Москва, ВИЛС-МАТИ.
2. Clemens H., Mayer S. (2013) Design, processing, microstructure, properties and applications of advanced intermetallic TiAl alloys. *Advanced Engineering Materials*, 15(4), 191–215.
3. Lipsitt H. A., Shechtman D., Schafrlik R. E. (1975) The plastic deformation of TiAl. *Met. Transact. A.*, 6, 1991–1998.
4. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. (2008) *Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекреационных металлов*. Киев, Наукова думка.
5. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
6. Тригуб Н.П., Дереча А.Я., Калинин А.Н. (1998) Рафинирование титана в электронно-лучевых печах с промежуточной емкостью. *Пробл. спец. электрометаллургии*, 2, 16–20.
7. Тихоновский А.Л., Тур А.А. Кравец А.Н. и др. (1992) Электронно-лучевая установка УЭ-208. *Там же*, 1, 71–74.
8. Каблов Е.Н., Лукин В.И. (2008) Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники. *Автоматическая сварка*, 11, 76–82.
9. Saunders N., Miodownik A.P., Cahn R.W. (1998) CALPHAD — Calculation of phase diagrams. *Pergamon Materials Series*, Vol. 1, Elsevier Science, Oxford.
10. Fan Z., Tsakiroopoulos P., Miodownik A.P. (1994) A generalized law of mixtures. *J. Mater. Sci.*, 29, 141–150.
11. Lukas H.L., Fries S.G., Sundman B. (2007) *Computational thermodynamics: The Calphad method*. Cambridge, U.K., Cambridge University Press.
12. https://www.matcalc.at/images/stories/Download/Database/mc_al_v2.029.tdb
13. Hari Kumar K.C., Wollants P., Delaey L. (1994) Thermodynamic calculation of Nb–Ti–V phase diagram. *Calphad*, 18(1), 71–79.
14. Liang Y., Guo C., Li C. (2008) Thermodynamic modeling of the Al–Cr system. *J. Alloys Compd.*, 460(1–2), 314–319.
15. Witusiewicz V.T., Bondar A.A., Hecht U., Velikanova T. Ya. (2009) The Al–B–Nb–Ti system IV. Experimental study and thermodynamic reevaluation of the binary system Al–Nb and Al–Nb–Ti systems. *Ibid.*, 472, 133–161.

References

1. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
2. Clemens, H., Mayer, S. (2013) Design, processing, microstructure, properties and applications of advanced intermetallic TiAl alloys. *Advanced Engineering Materials*, 15(4), 191–215.
3. Lipsitt, H. A., Shechtman, D., Schafrlik, R. E. (1975) The plastic deformation of TiAl. *Met. Transact. A.*, 6, 1991–1998.
4. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. (2008) *Electron beam melting of refractory and high-reactive metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
5. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Trigub, N.P., Derecha, A.Ya., Kalinyuk, A.N. (1998) Refining of titanium in electron beam furnaces with cold hearth. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, 2, 16–20 [in Russian].
7. Tikhonovsky, A.L., Tur, A.A., Kravets, A.N. et al. (1992) Electron beam installation UE-208. *Ibid.*, 1, 71–74 [in Russian].
8. Kablov, E.N., Lukin, V.I. (2008) Intermetallics based on titanium and nickel for advanced engineering products. *The Paton Welding J.*, 11, 65–70.
9. Saunders, N., Miodownik, A.P., Cahn, R.W. (1998) CALPHAD — Calculation of phase diagrams. *Pergamon Materials Series*, Vol. 1, Elsevier Science, Oxford.
10. Fan, Z., Tsakiroopoulos, P., Miodownik, A.P. (1994) A generalized law of mixtures. *J. Mater. Sci.*, 29, 141–150.
11. Lukas, H.L., Fries, S.G., Sundman, B. (2007) *Computational thermodynamics: The Calphad method*. Cambridge, U.K., Cambridge University Press.
12. https://www.matcalc.at/images/stories/Download/Database/mc_al_v2.029.tdb
13. Hari Kumar, K.C., Wollants, P., Delaey, L. (1994) Thermodynamic calculation of Nb–Ti–V phase diagram. *Calphad*, 18(1), 71–79.
14. Liang, Y., Guo, C., Li, C. (2008) Thermodynamic modeling of the Al–Cr system. *J. Alloys Compd.*, 460(1–2), 314–319.
15. Witusiewicz, V.T., Bondar, A.A., Hecht, U., Velikanova, T. Ya. (2009) The Al–B–Nb–Ti system IV. Experimental study and thermodynamic reevaluation of the binary system Al–Nb and Al–Nb–Ti systems. *Ibid.*, 472, 133–161.

СТРУКТУРА ІНТЕРМЕТАЛІДНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ Ti–Al–Nb–Cr

В.А. Костін, Г.М. Григоренко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розглянуто сплави на основі алюмінідів титану, які є сучасними перспективними матеріалами для виготовлення деталей та механізмів у судно-, машинобудуванні, авіаційній і космічній техніці. Основним способом отримання якісних зливок інтерметалідів на основі системи Ti–Al є електронно-променева плавка з проміжною ємністю. Вивчені структура та властивості інтерметалідного сплаву Ti–Al–Nb–Cr та побудована розрахункова рівноважна діаграма стану. Показано, що в центральній частині зливка структура сплаву складається майже з 85...90 об. % ($\gamma + \alpha_2$)-фази, масивних ділянок γ -фази біля 10 об. %, а також невеликої частки до 3...5 об. % кубічної B2-фази, розташованої по межах зерен. На основі методології CALPHAD побудовано рівноважні трьохкомпонентні діаграми стану систем Ti–Al–Nb–Cr. Бібліогр. 15, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: титанові сплави; інтерметаліди; алюмініди титану; фазові перетворення; Gleeble 3800; трійні діаграми стану

STRUCTURE OF INTERMETALLIC TITANIUM ALLOY OF Ti–Al–Nb–Cr SYSTEM

V.A. Kostin, G.M. Grigorenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper deals with alloys based on titanium aluminides, which are modern promising materials for manufacturing parts and mechanisms in ship-building, mechanical engineering, aviation and aerospace engineering. Cold-hearth electron beam melting is the main method to produce sound ingots of intermetallics based on Ti–Al system. Structure and properties of an intermetallic alloy of Ti–Al–Nb–Cr system were studied, and calculated equilibrium state diagram was plotted. It is shown that in the ingot central part the alloy structure consists approximately of 85...90 vol. % of ($\gamma + \alpha_2$)-phase, massive sections of γ -phase of about 10 vol. %, as well as small fraction of 3...5 vol. % of cubic B2-phase, located along the grain boundaries. CALPHAD methodology was used to plot the equilibrium ternary state diagrams of Ti–Al–Nb–Cr systems. Ref. 15, Tabl. 2, Fig. 4.

Key words: titanium alloys; electron beam melting; intermetallics; titanium aluminides; phase transformations; ternary state diagrams

Поступила в редакцію 26.11.2019

Передплата — 2020 на журнал «Сучасна електрометалургія»
www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/sem
Передплатний індекс 70693

Україна		Зарубіжні країни	
на півріччя	на рік	на півріччя	на рік
400 грн.	800 грн.	30 дол. США	60 дол. США

У вартість передплати включена доставка рекомендованою бандероллю.

Передплату на журнал «Сучасна електрометалургія» можна оформити безпосередньо через редакцію або по каталогам передплатних агентств: ДП «Преса», «Пресцентр», «Меркурій» (Україна); каталог зарубіжних видань «Белпочта» (Білорусь); каталог АТ «Казпочта» видання України (Казахстан); каталог «Роспечать» (РФ).

Правила для авторів, ліцензійні угоди, архівні випуски журналів на сайті видавництва www.patonpublishinghouse.com.
У 2020 р. у відкритому доступі випуски журналів з 2009 по 2018 рр. в форматі *.pdf.

Реклама в журналі «Сучасна електрометалургія»

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках наступних розмірів

- ◆ Перша сторінка обкладинки, 200×200 мм
- ◆ Друга, третя та четверта сторінки обкладинки, 200×290 мм
- ◆ Вклейка А4, 200×290 мм
- ◆ Розворот А3, 400×290 мм
- ◆ А5, 165×130 мм

Вартість реклами

- ◆ Ціна договірною
- ◆ Передбачена система знижок
- ◆ Вартість публікації статті на правах реклами становить половину вартості рекламної площі
- ◆ Публікується тільки профільна реклама
- ◆ Відповідальність за зміст рекламних матеріалів несе рекламодавець

Контакти:

Тел./факс: (38044) 200 82 77, 205 22 07
 E-mail: journal@paton.kiev.ua
 www.patonpublishinghouse.com

Підписано до друку 24.12.2019. Формат 60×84/8. Офсетний друк.
 Ум. друк. арк. 7,44.
 Друк ТОВ «ДІА».