

УДК 669

Синтез высокоэнтروпийного интерметаллического сплава системы AL–TI–NI–CR–V–ZR методом СВС-металлургии

Ким Евгений Давидович^(*)

010848@togudv.ru

SPIN-код: 9318-9559

Попова Виктория Сергеевна

012476@togudv.ru

Ри Эрнст Хосенович

003232@togudv.ru

SPIN-код: 7783-3389

ТОГУ, Хабаровск, Россия

Аннотация. В данной статье рассматривается процесс синтеза высокоэнтропийного интерметаллического сплава на основе системы Al–Ti–Ni–Cr–V–Zr с использованием метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Описаны основные этапы процесса, включая выбор исходных материалов, подготовку шихты, проведение синтеза и последующую обработку полученного материала. Приводятся данные о химическом составе и микроструктуре полученных образцов, а также обсуждаются их физико-механические свойства.

Ключевые слова: высокоэнтропийный интерметаллический сплав, система Al–Ti–Ni–Cr–V–Zr, СВС-металлургия, химический состав, микроструктура, сканирующая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ

Synthesis of high - entropy intermetallic alloy in the system AL–TI–NI–CR–V–ZR by SHS metallurgy method

Kim Evgeny Davidovich^(*)

010848@togudv.ru

SPIN-code: 9318-9559

Popova Victoria Sergeevna

012476@togudv.ru

Ri Ernst Khosenovich

003232@togudv.ru

SPIN-code: 7783-3389

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Abstract. The present paper discusses the synthesis process of high-entropy intermetallic alloy based on the system Al–Ti–Ni–Cr–V–Zr using self-propagating high-temperature synthesis (SHS) method. Main stages of the process are described, including selection of initial materials, preparation of charge mixture, carrying out synthesis itself, and subsequent treatment of the obtained material. Data concerning chemical composition and microstructure of resulting samples are provided along with discussion of their physico-mechanical properties.

Keywords: high-entropy intermetallic alloy, Al–Ti–Ni–Cr–V–Zr system, SHS metallurgy, chemical composition, microstructure, scanning electron microscopy, X-ray diffraction analysis

Введение. Новые материалы являются основой для развития новых технологий. Металлические материалы, в частности, сыграли историческую роль в истории человечества — от Бронзового века до наших дней, эволюционируя свою химию и микроструктуру для повышения функциональности. Сплавы классифицируются на две основные группы в зависимости от их атомной структуры: твердые растворы с неупорядоченной структурой атомов и интерметаллические соединения (ИС) с упорядоченным расположением атомов. Последние стабилизируются только в узком диапазоне химических составов, где составляющие атомы занимают определенные позиции в сверхрешеточной структуре. ИС привлекают внимание как материалы для широкого спектра промышленных применений благодаря уникальному сочетанию технологически важных свойств, таких как сильная атомная связь с гибридным металлическим, ионным и ковалентным характером, высокая прочность при повышенных температурах, хорошая термическая стабильность и подходящая устойчивость к окислению и коррозии [1–3]. Длинно-диапазонная упорядоченность в ИС эффективно подавляет атомную диффузию, обеспечивая лучшую устойчивость к явлениям, связанным с диффузией, таким как миграция границ зерен, подъем дислокаций и рост зерен, что приводит к превосходству ИС над твердыми растворами по прочности и стабильности при высоких температурах [1]. Еще одной значимой характеристикой ИС является так называемое аномальное поведение предела текучести, при котором предел текучести увеличивается, а не уменьшается с повышением температуры [4, 5]. Вследствие этого ИС стали объектом обширных исследований для применения в конструкциях, работающих при высоких температурах [6, 7].

Однако из-за своей упорядоченности и некоторой степени ионности структуры ИС обладают нежелательной пластичностью и хрупкостью при комнатной температуре, что серьезно ограничивает их практическое применение [8].

Целью настоящего исследования является разработка методики синтеза высокоэнтропийного интерметаллического сплава на основе системы Al–Ti–Ni–Cr–V–Zr с применением метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Методика и материалы исследования. Для успешного выполнения поставленной цели и решения исследовательских задач был разработан комплексный подход, включающий несколько этапов подготовки и проведения эксперимента.

Термодинамические расчеты проводились для прогнозирования устойчивости интерметаллических фаз и выявления возможных побочных реакций во время синтеза. Расчеты основывались на минимизации свободной энергии Гиббса для исследуемой системы.

Для синтеза интерметаллического сплава использовались чистые оксиды металлов: титан (Ti), никель (Ni), хром (Cr), ванадий (V) и цирконий (Zr), кальций фтористый CaF_2 (98,0 мас. %, ТУ 2621-007-69886968–2015 с изм. 1), NaNO_3 (ГОСТ 4168–79, х. ч.) и порошок алюминия ПА-4 (98,0 мас. %, ГОСТ

6058–73). Чистота каждого компонента составляла не менее 99,9 %. Все компоненты предварительно очищались от загрязнений путем прокалики при температуре около 500 °С перед смешиванием.

Синтез высокоэнтропийных сплавов проводили в жаропрочных керамических тиглях, футерованных огнеупорным материалом.

Методика подготовки шихты включает обработку в планетарной мельнице PULVERISETTE 5 с последующей просушкой в вакуумном сушильном шкафу ШС-90/В при температуре 80 °С.

Исходные компоненты перемешивали в определенном стехиометрическом соотношении в течение 15 минут до однородного состава, засыпали полученную смесь в тигель. В качестве запала — инициатора горения — заранее прибавляли 200 мг магниевого порошка без дополнительных окислителей. С учетом потерь при истирании в мельнице масса каждого образца составляла $63 \pm 0,5$ г. После воспламенения шихты по всему объему смеси распределяется фронт горения. Далее, за фронтом горения, формируется слой расплава продуктов горения, который состоит из двух фаз: металла и шлака (Al_2O_3). Под действием гравитации, из-за разницы в удельном весе и их взаимной нерастворимости, происходит фазоразделение. Вследствие теплообмена расплав остывает и в завершении процесса кристаллизуется.

В результате реакции образуется двухслойный продукт: компактный металлический слиток в нижнем слое и оксидный шлак — в верхнем, которые легко отделяются друг от друга.

Анализ элементного состава полученных слитков проводили с использованием рентгено-флуоресцентного спектрометра Спектроскан МАКС-GV. Металлографический анализ структуры — на оптическом микроскопе MICRO 200.

Для исследования морфологии и элементного состава структурных составляющих сплавов использовались методы растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа на аналитическом исследовательском комплексе на базе FE-SEM Hitachi «SU-70» с приставками для элементного ЭДС анализа (Thermo Scientific Ultra Dry).

Определение микротвердости производилось методом Виккерса (HV) на микротвердомере Shimadzu «HNV-G21DT».

Результаты и обсуждения. По результатам микрорентгеноспектрального анализа полученные сплавы представляют собой композиционные материалы с гетерофазной структурой (см. таблицу).

Непрерывный твердый раствор ОЦК белого цвета. Кристаллы имеют многогранную форму с размерами 10 мкм (точки 1–2, 4–6, рис. 1);

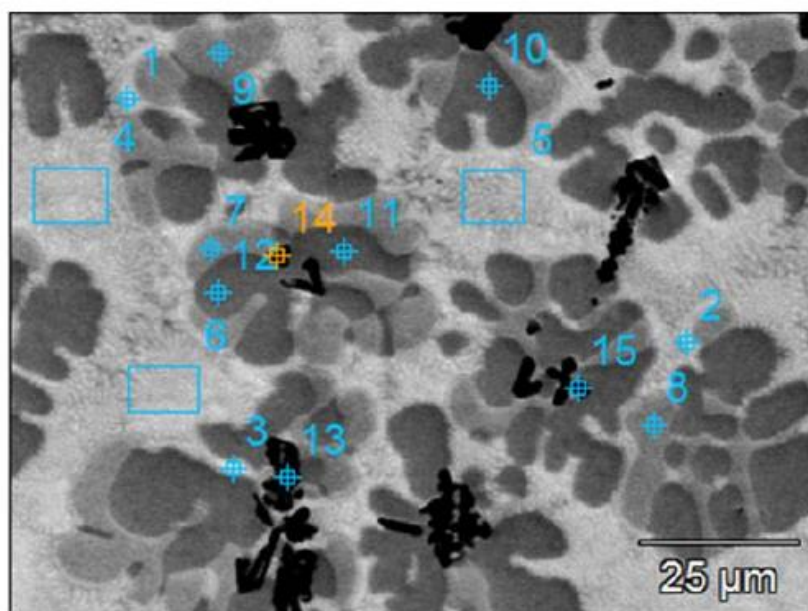
Алюминид никеля светло-серого цвета легированный Ti, V, Cr (точки 7–9, 14, рис. 1). Кристаллы положены по контуру твердых растворов хрома с алюминием и цирконием.

Твердый раствор хрома с алюминием, ванадием и цирконием, легированный титаном и никелем темно-серого цвета (точки 10–12, 3, рис. 1). Кристаллы имеют эллипсовидную форму с размерами 10 мкм.

Результаты элементного анализа структурных составляющих сплава AlTiNiCrVZr

Точки анализа	Элемент						Микротвердость, МПа
	Al	Ti	V	Cr	Ni	Zr	
1–2, 4–6	39,15	15,72	3,57	10,59	24,00	6,97	745
7–9, 14	45,75	4,54	1,20	4,38	44,13		966
10–12, 3	22,86	4,85	18,40	47,51	5,69	22,86	805
13, 15	5,71	79,105		4,02	4,01	7,16	766

Легированный Zr, Cr, Ni, Al твердый раствор титана (точки 13, 15, рис. 1), имеет темный цвет и располагается в межзеренной области, размеры 8–10 мкм.



Микроструктура и точки анализа сплава AlTiNiCrVZr в отраженных электронах

Экспериментально установлено, что микротвердость интерметаллидных фаз существенно выше микротвердости матричного сплава. Сплавы подобного состава могут найти применение при получении изделий с повышенной прочностью и термостойкостью

Список источников

- [1] Russell A.M. Ductility in intermetallic compounds. Advanced engineering materials, 2003, vol. 5, no. 9, pp. 629–639.
- [2] Stoloff N.S., Liu C.T., Deevi S.C. Emerging applications of intermetallics. Intermetallics, 2000, vol. 8, no. 9–11, pp. 1313–1320.
- [3] Paul A. R., Mukherjee M., Singh D. A critical review on the properties of intermetallic compounds and their application in the modern manufacturing. Crystal research and technology, 2022, vol. 57, no. 3, art. no. 2100159.

- [4] Vamsi K.V., Karthikeyan S. Deformation modes and yield strength anomaly in L12 compounds. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 860, art. no. 158411.
- [5] Caillard D. Yield-stress anomalies and high-temperature mechanical properties of intermetallics and disordered alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, vol. 319, pp. 74–83.
- [6] Yamaguchi M., Inui H., Ito K. High-temperature structural intermetallics. *Acta materialia*, 2000, vol. 48, no. 1, pp. 307–322.
- [7] Deevi S.C. Advanced intermetallic iron aluminide coatings for high temperature applications. *Progress in Materials Science*, 2021, vol. 118, art. no. 100769.
- [8] Bochenek K., Basista M. Advances in processing of NiAl intermetallic alloys and composites for high temperature aerospace applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 2015, vol. 79, pp. 136–146.