

ОТЗЫВ

официального оппонента Попова Николая Артемьевича на диссертационную работу Юрченко Никиты Юрьевича «Разработка и исследование высокоэнтропийных сплавов с высокой удельной прочностью на основе системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность темы диссертации. Работа рассматривает влияние состава и термической обработки на формирование структуры в новом классе материалов – высокоэнтропийных сплавах (ВЭСах) системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr с целью получения в них высокого комплекса свойств, что является актуальной задачей для металловедения как с научной, так и практической точек зрения. Существуют работы различных исследователей о том, что сплавы такого типа можно рассматривать, как перспективные с точки зрения жаропрочных и жаростойких характеристик, однако конкретные составы сплавов до настоящего времени однозначно не определены. Поэтому тема диссертационной работы Юрченко Н.Ю., посвященная разработке и исследованию высокоэнтропийных сплавов системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr, является своевременной и **актуальной**.

Структура и основное содержание работы. Диссертационная работа Юрченко Н.Ю. изложена на 187 страницах машинописного текста, включает 65 рисунков и 25 таблиц, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 241 источник.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи работы, представлены ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы диссертационного исследования, положения и результаты, выносимые на защиту, проведена оценка степени достоверности результатов, приведен перечень конференций и семинаров, где работа апробирована и доложена, указан вклад автора в работу и количество опубликованных статей в журналах, входящих в перечень ВАК, и тезисов в трудах конференций.

Первая глава «Обзор литературы» освещает современное состояние научных исследований по тематике диссертационной работы. Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой высокоэнтропийных суперсплавов, их механических свойств и прогнозирования фазового состава. Подробно описаны критерии формирования фаз и термодинамическое моделирование в ВЭСах. В заключении главы приведена постановка

задач диссертационного исследования. В целом, глава дает достаточное представление о направлениях работы и накопленных на настоящий момент данных по рассматриваемой проблеме.

Во второй главе приведены химические составы ВЭСов, исследуемых в работе, представлены методы получения сплавов и режимы их термической обработки, а также используемые в диссертации методики термодинамического моделирования. анализа структуры (растровая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ), стандартных механических испытаний на сжатие и определение микротвердости, испытания на ползучесть и сопротивление окислению. Описание сплавов, методик их получения и режимов обработки, а так методов исследования, которые использованы в экспериментальных разделах диссертации, отражено в главе достаточно полно.

В третьей главе представлены результаты термодинамического моделирования и рассчитанных феноменологических параметров для сплавов системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr. Были определены четырехкомпонентные эквивалентные композиции, содержащие Al. Разработан критерий формирования фаз Лавеса способный корректно работать для высокоэнтропийных сплавов, имеющих в своем составе Al и элементы 4-6 групп.

В четвертой главе автор анализирует влияние химического состава исследованных сплавов на структуру и ее стабильность при высокотемпературных выдержках. Им показано, что легирование системы Al-Nb-Ti-V как хромом, так и цирконием уменьшает степень упорядочения и приводит к выделению интерметаллидных фаз. На основании результатов рентгеноструктурного анализа и просвечивающей микроскопии диссертант сделал вывод о том, что это фазы Лавеса типа Cr_2Nb и $ZrAlV$ с гексагональной решеткой (C14), а также гексагональная фаза Zr_5Al_3 . Полученные в главе результаты дают хорошее представление о влиянии температуры отжига на формирование структуры и фазового состава сплавов Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr.

В пятой главе проведено исследование влияния легирования на механические свойства сплавов и показано, что введение как хрома, так и циркония повышает прочность сплавов при температурах до $800^\circ C$ и понижает пластичность. Обнаруженное автором anomальное повышение пластичности в сплаве с $Zr = 0,5$ при комнатной температуре, по мнению оппонента, нуждается в более детальном подтверждении. В этой же главе диссертант оценивает окисление сплава $AlNbTiVZr_{0,25}$, который выбран им как оптимальный по механическим свойствам при температурах до $800^\circ C$. Также проведена оценка сопротивления ползучести при $600^\circ C$ и выполнено сравнение данного сплава с железохромоникелевыми и никелевыми суперсплавами по удельному пределу ползучести.

В заключении приведены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

Научная новизна диссертационной работы Юрченко Н.Ю. несомненна. Диссертация вносит значительный вклад в развитие современных научных представлений о формировании структуры и свойств в новом перспективном классе материалов, к которым относятся высокоэнтропийные сплавы. По мнению оппонента, к наиболее значимым научным результатам работы следует отнести:

- Построение квазибинарных фазовых диаграмм систем AlNbTiV-Cr и AlNbTiV-Zr , которые позволяют прогнозировать образование вторых фаз различной стехиометрии в зависимости от конкретного состава и температуры обработки;
- Установление влияния легирования хромом и цирконием на степень упорядочения и структуру базовой B2 однофазной композиции AlNbTiV , а также на ее упрочнение как за счет твердорастворного механизма, так и за счет выделения вторых фаз.

Основная практическая значимость полученных результатов диссертационной работы Юрченко Н.Ю., по мнению оппонента, состоит в том, что на основе проведенных исследований был разработан сплав $\text{AlNbTiVZr}_{0,25}$ обладающий плотностью менее 6 г/см^3 и более высокими удельными пределами текучести и ползучести. Данные величины превосходят механические свойства промышленных железохромникелевых, никелевых и титановых сплавов, применяемых до температуры 700°C . Состав сплава защищен патентом РФ на изобретение.

Полученные результаты работы соответствуют поставленным целям и задачам, их достоверность подтверждается комплексным подходом к проведению исследований с применением нескольких взаимно дополняющих методик.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В главе 2 в таблице 2 на стр. 62 диссертации при описании химических составов исследуемых ВЭСов приведено содержание только основных легирующих элементов. Возникает вопрос – определялось ли в ВЭСах содержание примесей, которые могут играть существенную роль в твердорастворном упрочнении?
2. Диссертант показывает, что введение хрома уменьшает степень дальнего порядка, однако при этом образуется достаточно большое количество фазы Лавеса Cr_2Nb , которая, очевидно, снижает концентрацию хрома в твердом растворе. Поэтому не совсем понятны причины значительного уменьшения степени дальнего порядка твердого раствора? Кроме

того, автор утверждает, что стабильность сплавов, легированных цирконием, выше, чем у сплавов с хромом. Непонятно, что при этом понимается под стабильностью?

3. При анализе жаростойкости диссертант говорит о двухстадийном механизме окисления при температурах 600 и 700°C. В тоже время при 900°C наблюдается одностадийный процесс, причем коэффициент “n” в последнем случае ближе к первой стадии низкотемпературных процессов. Поэтому непонятно, почему нет стадии «скалывания», по терминологии автора, в том случае, когда отслоение окарины более вероятно?

4. В пятой главе диссертант предполагает, что величина пластичности связана с концентрацией валентных электронов (КВЭ). В чем причина такого влияния? Повышенную пластичность в сплаве с долей циркония $x = 0,5$ (рис.47, стр.131) диссертант объясняет разупорядочением, но степень порядка уменьшается и при большем содержании циркония, а пластичность при этом низкая.

5. Диссертант предлагает оценивать твердость сплава в многофазном состоянии, считая, что все факторы, увеличивающие твердость, аддитивны. (Формула 27 на стр. 142). Вместе с тем, при достаточно близких значениях твердости различных фаз рекомендуется использовать аддитивность квадратов напряжений (для диссертанта – значений твердости), которая более реально оценивает прочность многофазной структуры.

Вышеуказанные вопросы и замечания не снижают общий высокий уровень диссертационной работы. Диссертация представляет собой завершённую работу, в рамках которой проведено большое количество комплексных экспериментальных исследований и дано их научное обоснование.

Диссертация соответствует отрасли технических наук, а именно пунктам 2 - «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях» и 3 - «Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов» паспорта специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Содержание автореферата Юрченко Н.Ю. соответствует содержанию диссертации. Результаты работы соответствуют поставленной цели и задачам работы и представлены на 6 международных конференциях, основные данные проведенных исследований опубликованы в 8 рецензируемых и рекомендованных ВАК РФ научных изданиях и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Заключение

Диссертационная работа Юрченко Н.Ю. на тему «Разработка и исследование высокоэнтропийных сплавов с высокой удельной прочностью на основе системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr» полностью удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения «О присуждении ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Юрченко Никита Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент:

Ведущий инженер кафедры

термообработки и физики металлов,

Уральского федерального университета имени

первого Президента России Б.Н. Ельцина,

кандидат технических наук, доцент

Попов Николай Артемьевич

Научная специальность:

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Дата подписания отзыва: « 2 » апреля 2019 г.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.

Ельцина

Тел.: +7(343)374-59-64; E-mail: n.a.popov@urfu.ru

ПОДПИСЬ *Попова Н.А.*
ЗАВЕРЯЮ.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ УРФУ
ОЗЕРЕЦ Н.Н.

