

## Отзыв

официального оппонента 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

Актуальность темы диссертации Н.Ю. Юрченко продиктована необходимостью создания новых материалов для конструкционных и функциональных применений, в частности, высокоэнтропийных (ВЭС) металлических сплавов. Существующие к настоящему времени научные исследования в России и за рубежом доказали перспективность этого направления. Надо отметить, что обширный класс этих материалов дает возможность экспериментаторам создавать необходимые композиции, обладающие вполне конкретным набором эксплуатационных свойств. В частности, данная работа посвящена разработке сплавов на основе системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr, обладающих низкой плотностью и являющихся перспективными для изготовления конструкций, работающих при высоких температурах. Необходимость создания таких материалов вместо железохромоникелевых или никелевых суперматериалов диктуется требованиями современных инновационных производств, поэтому актуальность темы не вызывает сомнений.

### Содержание диссертационной работы

Диссертационная работа изложена на 187 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 241 наименование.

**Во введении** обоснована актуальность выбора темы диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна работы и ее практическое значение.

**Первая глава** содержит обзор литературных данных по теме диссертации. Рассмотрены и проанализированы вопросы, касающиеся существующих методов прогнозирования фазового состава высокоэнтропийных материалов. Систематизированы феноменологические критерии образования фаз в сплавах, а также описаны возможности термодинамического моделирования для прогнозирования состава ВЭСов.

На основании анализа приведенного обзора литературных данных обоснованы цели и задачи исследований в рамках диссертационной работы.

**Во второй главе** дан перечень методов исследования, и приведены составы изученных композиций. Подробно описано применение программы Thermo –Calc в сочетании со специализированной базой данных для ВЭСов с целью моделирования фазовых диаграмм системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr. Описан способ получения слитков с переменной концентрацией циркония и хрома, перечислены методы измерения механических свойств, испытаний на ползучесть и сопротивление окислению. Дано описание метода структурного анализа.

**В третьей главе** представлен эксперимент по термодинамическому моделированию, и расчету ряда феноменологических параметров (энтальпии смешения, концентрации валентных электронов, средней разницы атомных радиусов и т.д.), на основании которого автором выбрана однофазная композиция с ОЦК структурой AlNbTiV. Дальнейший эксперимент касался моделирования фазового состава этого сплава, легированного хромом или цирконием, и определения состава частиц вторых фаз. Эти результаты послужили основой для разработки критерия, позволяющего прогнозировать образование фаз Лавеса в ВЭСах.

**Четвертая глава** посвящена результатам исследования структуры сплавов разной системы легирования и ее эволюция при высокотемпературных отжигах. Определены начальные концентрации циркония и хрома, при которых нарушается однофазность упорядоченной по типу B2 структуры. Структурные исследования подтверждены данными рентгеноструктурного анализа. Построены зависимости степени дальнего порядка от концентрации циркония и хрома. Большой объем материала занимает описание результатов электронно-микроскопических исследований тонкой структуры композиций разного состава до и после термической обработки. Наглядно продемонстрированы конкретные составы фаз Лавеса ( $C14$  и  $\sigma$ ) (с расшифровкой электронограмм) и фазы  $Zr_5Al_3$ . Проведено сравнение структурно – фазовой стабильности сплавов после длительного отжига, и выбран оптимальный состав ВЭСа.

**В пятой главе** представлены результаты измерений механических и ряда эксплуатационных свойств композиций. Установлено влияние легирующих компонентов на прочностные характеристики. Построены зависимости предела текучести и величины деформации до разрушения от концентрации хрома и циркония при разных температурах испытаний. Интересными и информативными являются результаты сравнения удельного предела текучести экспериментальных композиций и известных железохромовых и никелевых суперсплавов. На основании структурных исследований термической

стабильности ВЭСов и их механических свойств сделан выбор оптимального состава, обладающего высокой удельной прочностью при  $T \leq 800^\circ\text{C}$ . В конце главы описаны эксперименты по измерению ряда эксплуатационных свойств этого сплава, таких как сопротивление окислению и ползучести. Представлены результаты изучения механизмов окисления при разных температурах. Наглядно, с построением гистограмм проведено сравнение пределов ползучести сплава  $\text{AlNbTiVZr}_{0,25}$  и широкого спектра известных сплавов на основе Fe, Ni и Ti.

В конце каждой главы приведены краткие выводы. **В заключении** сформулированы основные результаты и выводы по работе.

#### Научная новизна и достоверность результатов

В качестве наиболее важных и новых научных результатов можно указать следующие:

- использование метода термодинамического моделирования и расчета ряда феноменологических параметров для определения однофазной эквиатомной композиции  $\text{AlNbTiV}$  и эволюции фазового состава после легирования цирконием или хромом. Обоснование критерия формирования фаз Лавеса для ВЭСов, в состав которых входят алюминий и элементы 4-6 групп.
- на основании экспериментальных данных электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа установлены особенности влияния хрома или циркония на структуру и фазовый состав твердого раствора  $\text{B}_2$ , заключающиеся в снижении степени его упорядочения и выделения вторых фаз (фаз Лавеса разного состава и фазы  $\text{Zr}_5\text{Al}_3$ ).
- определены механизмы упрочнения в эквиатомном сплаве  $\text{AlNbTiV}$  до и после легирования цирконием или хромом и выявлены резервы повышения прочности материалов.

**Достоверность экспериментальных результатов** обеспечивается большим объемом выполненных исследований на аттестованных по химическому составу образцах с применением стандартных разнообразных методов структурного анализа, включая сканирующую и просвечивающую электронную микроскопию, и определения механических свойств. Для обработки результатов использованы апробированные компьютерные программы. Достоверность результатов термодинамического моделирования подтверждается согласованностью между расчетными и экспериментальными данными. Полученные в работе основные экспериментальные

результаты не противоречат и дополняют известные литературные данные других авторов, изучающих закономерности структурообразования в ВЭСах.

#### Практическая значимость диссертационной работы

В результате проведенных исследований разработан новый сплав  $\text{AlNbTiZr}_{0,25}$ , имеющий удельный предел текучести при температурах до  $800^\circ\text{C}$  ( $\text{УПТ}_{800^\circ\text{C}} = 154 \text{ кПа} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ ) и предел ползучести при  $600^\circ\text{C}$  ( $\sigma_{0,2/100/p}^{600^\circ\text{C}} \approx 100 \text{ кПа} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ ), по своим величинам, превосходящие механические свойства промышленных сплавов Fe-Cr-Ni, Ni и Ti сплавов, применяемых до температур  $700^\circ\text{C}$ , а также титановых интерметаллидных сплавов ( $\alpha_2 - \text{Ti}_3\text{Al}$  и орто -  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ ). Новизна разработки защищена Патентом РФ.

Для ВЭСов разного химического состава предложены оптимальные режимы термической обработки, обеспечивающие высокие прочностные и пластические характеристики сплавов.

Полученные в работе результаты доказали целесообразность использования композиций на основе  $\text{AlNbTiV}$ , легированных Zr и Cr, в качестве перспективных ВЭСов для работы в условиях высоких температур.

При общей положительной оценке работы по тексту диссертации возникает ряд вопросов и замечаний.

#### Замечания по работе

1. Современные теоретические и экспериментальные представления о природе металлических многокомпонентных расплавов свидетельствуют об их микронеоднородной природе, поэтому для получения однородных по химическому и фазовому составу отливок необходимо оптимизировать температурно - временные параметры литья сплавов. В диссертации эти данные отсутствуют. В связи с этим вопрос. Каковы температура и скорость охлаждения расплавов системы Al-Nb-Ti-V-Cr-Zr, на основании каких экспериментов выбран пятикратный переплав слитков, и как контролировали однородность структуры?
2. При описании эволюции фазового состава сплава  $\text{Al}_5\text{вov}$  после отжига (раздел 4.2, таблицы 15 и 16) отсутствуют результаты по изменению морфологии и размера структурных составляющих, в частности, фаз Лавеса,  $\sigma$  - фазы и фазы  $\text{Zr}_5\text{Al}_3$ . Эти сведения нужны для оценки корректности измерений их микротвердости, приведенных в разделе 5.2.2.

3. Анализируя результаты испытаний механических свойств в сплавах с разным содержанием Cr и Zr, автор, помимо основных влияющих факторов, таких как твердорастворное упрочнение, степень упорядочения и наличие частиц вторых фаз, указывает концентрацию валентных электронов – КВЭ (стр. 136, 137). Какова природа влияния КВЭ на пластичность, и можно ли заранее использовать этот параметр для прогноза охрупчивания материалов такого класса.
  4. В диссертации отсутствуют сведения о возможности использования деформационно – термической обработки ВЭСов с целью изменения их свойств.. Перспективно ли применение такой технологии, и какие механические характеристики могут быть улучшены.
  5. В литературном обзоре по теме диссертации автор цитирует в основном работы зарубежных ученых, в то время как фундаментальные исследования структуры и свойств ВЭСов проводятся и в институтах РАН, в частности, в ИФМ УрО РАН. Результаты этих работ подробно изложены в рейтинговых физических журналах ЖТФ и ФММ.
  6. Несмотря на грамотное оформление диссертации в тексте обнаружены незначительные опечатки и неточности. Например, перепутаны номера рисунков на стр. 78 и 80; надпись таблицы 3 не соответствует ее содержанию (отсутствуют данные о модуле сдвига и типе кристаллической решетки); встречаются неправильные ссылки (см. [120] на стр. 72) и т.д.
- Данные замечания не снижают общей положительной оценки выводов диссертации и носят, в основном, характер уточнения её результатов.

#### Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа Н.Ю. Юрченко является законченной научно – квалификационной работой, в которой получены новые и важные экспериментальные результаты. Содержание диссертации соответствует формуле п.2 паспорта специальности 05.16.01 (технические науки): 2. Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях.

Текст автореферата полностью отражает содержание диссертации. Полученные результаты соответствуют цели и задачам диссертационной работы и апробированы в восьми публикациях автора в рецензируемых и рекомендованных ВАК научных изданиях, а также доложены на шести международных конференциях по профилю работы.

## Заключение

Диссертационная работа Н.Ю. Юрченко на тему "Разработка и исследование высокоэнтропийных сплавов с высокой удельной прочностью на основе системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr" полностью соответствует требованиям п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 № 842. Считаю, что Н.Ю. Юрченко заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01.- Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент

доктор технических наук, профессор

*С.И.И.*

Ирина Григорьевна Бродова

Научная специальность -05.16.01.- Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Главный научный сотрудник лаборатории цветных сплавов

ФГБУН Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН

620108 г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д.18.

тел. (343)378-36-11 e – mail: [brodova@imp.uran.ru](mailto:brodova@imp.uran.ru)

