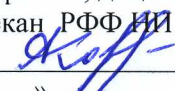


Министерство образования и науки Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
Физический факультет  
Кафедра физики металлов

ДОПУСТИТЬ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ГЭК

Руководитель ООП  
к.ф.-м.н., доцент кафедры КЭиФ,  
декан РФФ НИ ТГУ,  
 А.Г. Коротаев  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.


### НАУЧНЫЙ ДОКЛАД


об основных результатах подготовленной научно - квалификационной работы  
(диссертации)

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ НА КИНЕТИКУ ОКИСЛЕНИЯ СПЛАВА  
СИСТЕМЫ V-Cr-Ta-Zr

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров в  
аспирантуре  
направление подготовки 01.04.07 - Физика конденсированного состояния

Цверова Анастасия Сергеевна

Научный руководитель  
д.ф.-м.н., профессор кафедры  
физики металлов  
 А.Н. Тюменцев  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Автор работы  
аспирант  
 А.С. Цверова

Малоактивируемые ванадиевые сплавы обладают уникальным комплексом физико-механических свойств и рассматриваются в качестве перспективных конструкционных материалов для новых поколений ядерных и термоядерных реакторов [1]. Одно из основных требований, предъявляемых к материалам такого класса – обеспечение длительной высокотемпературной прочности при сохранении необходимого уровня низкотемпературной пластичности [2].

Известно, что сплавы на основе ванадия являются гетерофазными, в силу высокой химической активности к примесям внедрения (O, C, N) [3]. При высоких концентрациях этих примесей формируются пересыщенные твердые растворы, частицы вторичных фаз. Для модификации их структурно-фазового состояния в настоящее время применяются методы термомеханической (ТМО) [4] и химико-термической обработок (ХТО) [5]. В результате термомеханической обработки грубодисперсные включения фаз внедрения трансформируются в мелкодисперсные. При реализации химико-термической обработки меняется фазовый состав таких включений. В ходе химико-термической обработки формируется жаростойкая оксидная фаза, что обеспечивает значительный рост прочностных свойств при высоких температурах. В то же время с увеличением прочности часто наблюдается снижение пластичности. При этом следует отметить очень сильную зависимость термической стабильности и высокотемпературной прочности ванадиевых сплавов разных систем от концентрации кислорода [5].

Совместно с научной группой автором проведены исследования:

- влияния режима термомеханической обработки на уровень механических свойств малоактивируемого сплава системы V–Cr–Ta–Zr;
- влияния микроструктуры сплава V–Cr–Ta–Zr на кинетику окисления в процессе химико-термической обработки.

Использован ванадиевый сплав V–6.99Cr–1.8Ta–0.46Zr (ат.%) производства АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара».

Проведено детальное исследование особенностей дефектной и гетерофазной структуры в зависимости от режима ТМО. Выбор температуры стабилизирующего отжига проведен на основе экспериментального исследования влияния температуры на микроструктуру и микротвердость сплава V–Cr–Ta–Zr. В результате чего выявлены основные этапы протекания процессов релаксации. Отжиги при температурах 700 – 800 °С сопровождаются процессами возврата. Термообработка при 900 °С характеризуется началом первичной рекристаллизации активная фаза которой протекает до 1000 °С включительно. Увеличению температуры отжига в интервале 1100 – 1400 °С

сопутствуют процессы собирательной рекристаллизацией. Температурой начала вторичной рекристаллизации сплава V–Cr–Ta–Zr является 1500 °С.

Термомеханическая обработка по режиму I заключается в нескольких циклах деформации прокаткой при комнатной температуре до  $\varepsilon \approx 50$  % с часовыми промежуточными вакуумными отжигами (1000 °С) и последующем стабилизирующем часовом отжиге в вакууме при температуре 1100 °С. Термомеханическая обработка по режиму II включает в себя гомогенизирующий отжиг при 1400 °С продолжительностью 1 час, затем несколько циклов прокатки (до  $\varepsilon \approx 20 \div 30$  %) при комнатной температуре с промежуточными вакуумными отжигами при 600 ÷ 700 °С продолжительностью 1 час. [4]

Установлено, что в образцах после обработки по режиму II и последующей термической стабилизации при температуре 1100 °С наблюдаются границы зерен, содержащие высокую плотность дефектов кристаллического строения; на границах зерен встречаются частицы мелкой и средней фракций, которые способствуют эффективному закреплению этих границ; внутри отдельных зерен наблюдается формирование полигонального структурного состояния, представленного разориентированными на малые углы ( $0.5^\circ - 1.5^\circ$ ) фрагментами, размеры которых составляют от десятых долей микрона до микрона.

Установлено, что в результате ТМО II сплава системы V–Cr–Ta–Zr значения кратковременной прочности ( $\sigma_{0.1}$ ) повышаются на 10 – 20 %, при этом сохраняются высокие (до 25 %) значения пластичности как при комнатной, так и при повышенной температурах. Предполагается, что основным фактором, определяющим эти особенности, является неоднородный характер пространственного распределения мелкодисперсных частиц, выделяемых в процессе ТМО по режиму II.

Сравнение с результатами, полученными при изучении ванадиевых сплавов системы V–Ti–Cr [6] свидетельствует о более высокой термической стабильности микроструктуры сплава системы V–Cr–Zr–Ta.

Проведено сравнительное исследование особенностей зеренной и дефектной структуры сплава V–Cr–Ta–Zr после термомеханических обработок с заключительным часовым отжигом при температуре 1100 °С и последующей деформации прокаткой при комнатной температуре. Установлено, что увеличение степени пластической деформации сопровождается измельчением зеренной и субзеренной структуры, значительным увеличением доли мелких зерен, повышением скалярной плотности дислокаций.

Модификация структурно-фазового состояния после ТМО оказывает существенное влияние на процессы при ХТО. Как известно [1], в соответствии с законом Вагнера процесс формирования поверхностной окалины характеризуется некоторой стадийностью.

Однако экспериментальных работ по количественному определению скорости окисления в интервале малых времен обработки не проводилось. В работе на примере сплава V–Cr–Ta–Zr определены скорости окисления ( $k$ ) в зависимости от структурного состояния на разных временных интервалах окисления.

Установлено, что толщина формируемой окалина сильно не однородна. Окалина, формирующаяся в процессе окисления на воздухе, состоит из чешуек окисла  $V_2O_5$  пластинчатой формы, размеры которых в длину составляют от 3 до 7 мкм и от 1 до 3 мкм в ширину при толщине от 0,05 до 0,3 мкм. При этом увеличение продолжительности окисления способствует слипанию чешуек между собой. Хаотичное слипание чешуек окисла является причиной неоднородности формирующегося оксидного слоя. Поверхностная окалина характеризуется высокой хрупкостью и низкой адгезионной прочностью с поверхностью.

На начальном этапе (от 0 до 90 минут), для всех состояний, скорость окисления на порядок выше по сравнению с последующими стадиями. При этом дефектное структурное состояние способствует существенному (на десятки процентов) увеличению скорости окисления образцов сплава V–Cr–Ta–Zr при малых (до 60 мин.) временах химико-термической обработки на воздухе. При этом на образцах деформированных прокаткой до  $e = 1.6$  поверхностная окалина растет на  $\sim 10\%$  быстрее по сравнению с образцами непосредственно после термомеханической обработки и заключительного отжига при температуре 1100 °C и более чем на 3 % быстрее, чем на образцах, прокатанных до  $e = 0.7$ . Максимальные эффекты влияния структурного состояния проявляются на начальном этапе формирования окалина, что необходимо учитывать при разработке новых режимов химико-термической обработки.

Одной из важных особенностей формируемой при окислении на воздухе поверхностной окалина, является наличие открытой пористости, которая является результатом хаотичного слипания чешуек  $V_2O_5$  между собой. Именно наличие открытой пористости обеспечивает подвод кислорода к поверхности образца, на которой протекают процессы зарождения и роста чешуек. Высказано предположение, что снижение скорости окисления является следствием увеличения толщины окалина, способствующей замедлению подвода кислорода к поверхности образцов сплава V–Cr–Ta–Zr.

Результаты исследований опубликованы в 9 статьях, 3 из них – в журналах из перечня ВАК (Russian Physical Journal, Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез); 6 – в журналах, индексируемых в Scopus (Oxidation of Metals, AIP Conference, IOP Conference Series) и представлены на 11 конференциях.

Все представленные результаты получены при непосредственном участии автора.

Исследования проводились с использованием оборудования Томского материаловедческого центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Overview of the vanadium alloy researches for fusion reactors / Chen J.M. [et al.] // Journal of Nuclear Materials. – 2011. – V. 417. – P. 289-294.
- 2 Present status of vanadium alloys for fusion applications / Muroga T. [et al.] // Journal of Nuclear Materials. – 2014. – V. 455. – P. 263-268
- 3 Фромм Е. Газы и углерод в металлах / Е. Фромм, Е. Гебхардт – М.: Metallurgia, 1980. – 712 с.
- 4 Влияние режимов термомеханической обработки на особенности гетерофазной и зеренной структуры и уровень механических свойств сплава V-Cr-Zr-Ta / Дитенберг И.А. [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 115-120.
- 5 The influence of microstructure on oxidation rate of V-Cr-Ta-Zr alloy during its chemical-heat treatment / Ditenberg I.A. [et al.] // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 61, № 8. – P. 1506-1512.
- 6 Microstructure and mechanical properties of V–4Ti–4Cr alloy as a function of the chemical heat treatment regimes / Potapenko M.M. [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2015. – V. 78. – № 10. – P. 1087–1091.

# Отчет о проверке на заимствования №1



Автор: [tsverova@mail.ru](mailto:tsverova@mail.ru) / ID: 6963014

Проверяющий: [tsverova@mail.ru](mailto:tsverova@mail.ru) / ID: 6963014)

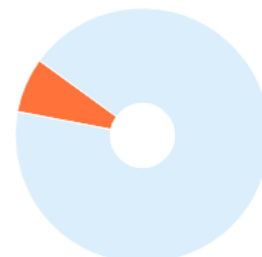
Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»- <http://users.antiplagiat.ru>

## ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 4  
Начало загрузки: 26.06.2019 15:12:14  
Длительность загрузки: 00:00:00  
Имя исходного файла: Научный доклад\_Цверова\_A\_C  
Размер текста: 285 кБ  
Символов в тексте: 9850  
Слов в тексте: 1174  
Число предложений: 95

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)  
Начало проверки: 26.06.2019 15:12:15  
Длительность проверки: 00:00:01  
Комментарии: не указано  
Модули поиска: Модуль поиска Интернет



ЗАИМСТВОВАНИЯ	ЦИТИРОВАНИЯ	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
6,54%	0%	93,46%

Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.  
Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.

Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.

Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.

Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.

Заимствования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.

Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Источник	Ссылка	Актуален на	Модуль поиска
[01]	2,41%	<a href="http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C21/C21.pdf">http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C21/C21.pdf</a>	<a href="http://lib.tpu.ru">http://lib.tpu.ru</a>	19 Ноя 2017	Модуль поиска Интернет
[02]	1,26%	<a href="http://www.ispms.ru/files/Conference/2017_m/sb_tez_2017.pdf">http://www.ispms.ru/files/Conference/2017_m/sb_tez_2017.pdf</a>	<a href="http://ispms.ru">http://ispms.ru</a>	14 Сен 2018	Модуль поиска Интернет
[03]	2%	<a href="https://esu.citis.ru/dissertation/KZ4MHOQBLCI71UZPFBDSLNA(2/2)">https://esu.citis.ru/dissertation/KZ4MHOQBLCI71UZPFBDSLNA(2/2)</a>	<a href="https://esu.citis.ru">https://esu.citis.ru</a>	20 Мар 2018	Модуль поиска Интернет

Еще источников: 1

Еще заимствований: 0,87%