

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА СПЛАВА СИСТЕМЫ V-CR-ZR-TA В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

А.С. ЦВЕРОВА¹, И.В. СМИРНОВ^{1,2}, К.В. ГРИНЯЕВ^{1,2}

¹Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

E-mail: tsverova@mail.ru

Малоактивируемые ванадиевые сплавы обладают уникальным комплексом физико-механических свойств, в виду чего рассматриваются в качестве перспективных конструкционных материалов для новых поколений ядерных и термоядерных энергетических установок [1 – 5]. Среди особых требований, предъявляемых к материалам такого класса, можно выделить обеспечение длительной высокотемпературной прочности (жаропрочности) при сохранении необходимого уровня низкотемпературной пластичности (технологичности) [2, 4]. На сегодняшний день наиболее широко исследованы ванадиевые сплавы системы V–Ti–Cr, также активно разрабатываются новые ванадиевые сплавы различных систем (V–W–Ti, V–Ti, V–W–Y, V–Y, V–Y–Ti–Mo, V–Y–W–C, V–Y–W–Mo–TiC, V–Cr–W–Zr и др.)

В настоящей работе проведено сравнительное исследование влияния режимов термомеханической обработки на особенности структурно-фазового состояния и уровень механических свойств малоактивируемого ванадиевого сплава системы V–Cr–Zr–Ta.

В работе использован сплав ванадия V–6.80 % Cr–6.10 % Ta–0.79 % Zr–0.031 % C–0.052 % O–0.009 % N (вес. %) (далее V–Cr–Zr–Ta). Образцы сплава подвергали термомеханической обработке (ТМО) по режимам I и II [6]. После ТМО по указанным режимам был проведен стабилизирующий одночасовой отжиг при 1100 °С. Проведены исследования поверхностного рельефа, особенностей разрушения, EBSD-анализ с использованием растрового электронно-ионного микроскопа FEI Quanta 200 3D с приставкой Pegasus. Исследования с применением методов просвечивающей электронной микроскопии проведены на электронном микроскопе Philips CM 30 TWIN при ускоряющем напряжении 300 кВ. Механические испытания образцов проведены на установке типа Поляни при температурах 20 °С и 800 °С.

В результате комплексной структурной аттестации методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии было установлено, что в изучаемом сплаве V–Cr–Zr–Ta после ТМО по режимам I и II наблюдается формирование качественно подобных структурных состояний. Зеренная структура представлена мелкокристаллической фракцией размерами от 3 до 15 мкм и отдельными крупными зернами размерами 30 и более мкм. Скалярная плотность дислокаций внутри зерен после обеих обработок не превышает значений порядка $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Гетерофазная структура изучаемого сплава после обработок по режимам ТМО I и ТМО II характеризуются тремя основными фракциями частиц вторых фаз: крупные (1 – 2 мкм), средние (50 – 400 нм) и наноразмерные (2 – 10 нм). Обнаружено, что данные частицы преимущественно представлены оксикарбонитридами на основе циркония.

В результате проведения механических испытаний было установлено, что значения кратковременной прочности ($\sigma_{0.1}$) изучаемого сплава после ТМО II выше по сравнению с ТМО I при температуре испытания ($T_{\text{исп.}}$) 20 °С на 17.5 %, а при $T_{\text{исп.}} = 800 \text{ °С}$ на 13 % (таблица 1). Важно заметить, что данный сплав после обеих обработок характеризуется высокой (до 30 %) пластичностью как при $T_{\text{исп.}} = 20 \text{ °С}$, так и при $T_{\text{исп.}} = 800 \text{ °С}$.

Установлено, что режим ТМО изучаемого сплава не оказывает влияния на вид фрактограмм, преимущественно представленных ячеистым характером разрушения. При этом наблюдается измельчение структурных элементов рельефа при увеличении температуры растяжения от 20 °С до 800 °С.

Таблица 1. Влияние режима обработки на механические свойства сплава системы V–Cr–Ta–Zr

| Режимы обработки | $T_{исп.} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ | | $T_{исп.} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ | |
|------------------|---|--------------|--|--------------|
| | $\sigma_{0.1}$, МПа | δ , % | $\sigma_{0.1}$, МПа | δ , % |
| ТМО I | 258 – 268 | 20 – 28 | 156 – 164 | 21 – 32 |
| ТМО II | 305 – 315 | 27 – 29 | 144 – 185 | 24 – 31 |

Температура стабилизации структурно-фазового состояния сплава системы V–Cr–Ta–Zr на 100 °C выше, по сравнению со сплавом системы V–4Ti–4Cr [7], и составляет 1100 °C, что свидетельствует о более высокой термической стабильности сплава системы V–Cr–Ta–Zr. Отличительной особенностью нового сплава является его высокая пластичность как при 20 °C, так и при 800 °C, что свидетельствует о его технологичности в широком температурном интервале.

В результате сравнительного исследования установлено, что применение термомеханической обработки по модифицированному режиму обеспечивает повышение уровня кратковременной прочности сплава системы V–Cr–Zr–Ta на 17.5 % при 20 °C и на 13 % при 800 °C. Более высокая термическая стабильность структурно-фазового состояния нового сплава, по сравнению со сплавом системы V–Ti–Cr, обеспечивает достижение практически тех же значений прочности после термической стабилизации при 1100 °C. Показано, что вне зависимости от режимов обработки сплав системы V–Cr–Ta–Zr характеризуется высокой (до 30 %) пластичностью как при 20 °C, так и при 800 °C, что свидетельствует о его высокой технологичности в широком температурном интервале.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013 – 2020 годы. Исследование проведено с использованием оборудования Томского материаловедческого центра коллективного пользования Национального Исследовательского ТГУ.

Список литературы

1. Chen J. M., Chernov V. M., Kurtz R. J., Muroga T. Overview of the vanadium alloy researches for fusion reactors // Journal of Nuclear Materials. – 2011. – Vol. 417. – P. 289-294.
2. Muroga T., Chen J. M., Chernov V. M., [et al.] Present status of vanadium alloys for fusion applications // Journal of Nuclear Materials. – 2014. – Vol. 455. – P. 263-268.
3. Tavassoli A.-A.F. Present limits and improvements of structural materials for fusion reactors – a review // Journal of Nuclear Materials. – 2002. – №302. – PP.73-88
4. Kurtz R. J., Abe K., Chernov V. M., [et al.] Recent progress on development of vanadium alloys for fusion // Journal of Nuclear Materials. – 2004. –Vol. 329-333. – P. 47-55.
5. Chen J. M., Muroga T., Qiu S. Y. [et al.] The development of advanced vanadium alloys for fusion applications // Journal of Nuclear Materials. – 2004. – Vol. 329-333. – P. 401-405.
6. Tyumentsev A. N., Korotaev A. D., Pinzhin Yu. P., [et al] Effect of the modes of thermomechanical treatment on the formation of the multiphase and grain structure of V–4Ti–4Cr alloys // Journal of Nuclear Materials – 2004. – Vol. 329-333. – P. 429-433.
7. Tyumentsev A.N., Ditenberg I.A., Grinyaev K.V. [et al.] The effect of thermomechanical treatment regimes on microstructure and mechanical properties of V–Me(Cr, W)–Zr–C alloys // Physics of Atomic Nuclei. – 2015. – V. 78. – № 10. – P. 1092-1099.