

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 669.292.5; 538.911

DOI: 10.17223/00213411/65/7/143

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ
НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФАЗ
В МАЛОАКТИВИРУЕМЫХ ВАНАДИЕВЫХ СПЛАВАХ
С ДИСПЕРСНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ***

А.Н. Тюменцев^{1,2}, И.И. Суханов², И.А. Дитенберг^{1,2}, В.М. Чернов³

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

³ АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов
им. акад. А.А. Бочвара», г. Москва, Россия

Ключевые слова: сплавы ванадия, дисперсное упрочнение, коалесценция, термическая стабильность.

Хорошие перспективы использования в качестве конструкционных материалов активных зон ядерных реакторов имеют малоактивируемые ванадиевые сплавы типа V–Ti–Cr(C,O,N) [1–5] и V–Cr–Me(W,Ta)–Zr(C,O,N) [6] с дисперсным упрочнением наноразмерными частицами карбидов и(или) оксидов титана или циркония. Необходимым условием повышения их жаропрочности и расширения интервала рабочих температур является высокая термическая стабильность наноразмерной гетерофазной структуры. В настоящей работе представлены результаты теоретического исследования термической стабильности такой структуры в ванадиевых сплавах с различным типом неметаллических фаз (TiC, ZrC, ZrO₂) в температурно-временных интервалах их технологической обработки и эксплуатации в активной зоне ядерных реакторов.

Термическая стабильность указанных выше фаз определяется, с одной стороны, их термодинамической стабильностью (температурными интервалами их существования на диаграммах состояния), с другой – скоростями коагуляции, отвечающими за термическую стабильность наноразмерной гетерофазной структуры.

Согласно [7], при отсутствии диаграмм состояния анализ термодинамической стабильности неметаллических фаз (карбиды, оксиды, нитриды и др.) можно провести в квазибинарном приближении, исходя из термодинамических потенциалов образования этих фаз. Величина растворимости карбидов типа MeC (Me – Ti, Zr) определяется при этом с использованием следующего соотношения:

$$(C_{Me}^p \gamma_{Me})(C_C^p \gamma_C) \approx \exp(\Delta G_{MeC}^0/R_0T). \quad (1)$$

Здесь C_{Me}^p и C_C^p – равновесные значения растворимости карбидообразующих элементов (Ti, Zr) и углерода в ванадии; γ_{Me} и γ_C – коэффициенты активности этих элементов; ΔG_{MeC}^0 – стандартные термодинамические потенциалы образования карбидных фаз.

Используя формулу (1), приближенное значение $\gamma_{Me} \sim 1$, соотношение $\gamma_C \approx \exp(\Delta G_{VC}^0/R_0T)$, а также с учетом того, что в процессе роста частиц карбидов лимитирующим фактором является диффузионная подвижность карбидообразующих элементов (Ti, Zr), оценка скорости коагуляции этих частиц может быть проведена на основе следующего выражения:

$$dR^3/dt = 8\sigma V^2 D_{Me} \exp[(\Delta G_{MeC}^0 - \Delta G_{VC}^0)/R_0T]/[9R_0TC_C^p], \quad (2)$$

где R – средний радиус частиц; t – время коагуляции; σ – энергия границы раздела частица – матрица; V – мольный объем карбида.

Аналогичное выражение для скорости коагуляции в ванадии частиц ZrO₂ записывается в виде

$$dR^3/dt = [8\sigma V^2 D_{Zr}/9R_0T(C_O^p)^2] \exp[(\Delta G_{ZrO_2}^0 - 2\Delta G_{VO}^0)/R_0T]. \quad (3)$$

Анализ выражений (1) – (3) показывает, что важным фактором, контролирующим скорости коагуляции неметаллических фаз, являются соотношения между стандартными термодинамическими потенциалами их образования ($\Delta G^0 = \Delta H - T\Delta S$) и соответствующими потенциалами карбидов и оксидов ванадия. Эти соотношения (точнее, величины $\Delta G_{MeC}^0 - \Delta G_{VC}^0$ и $\Delta G_{ZrO_2}^0 - 2\Delta G_{VO}^0$ для частиц MeC и ZrO₂ соответственно) определяют равновесную растворимость атомов титана или циркония, контролирующих скорости коагуляции этих частиц.

Проведенные по формулам (1) – (3) расчеты показали, что в карбидоупрочненных (V–TiC, V–ZrC) ванадиевых сплавах более высокая термодинамическая стабильность карбида ZrC на 1–2 порядка, по сравне-

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0008.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала
«Известия высших учебных заведений. Физика»
осуществляется на платформе
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>