

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК: 539.37; 539.42

DOI: 10.17223/00213411/65/2/82

ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ  
КЕРАМИЧЕСКИХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ НА ОСНОВЕ КАРБИДОВ\*

Д. Ван, Ю.А. Мировой, А.Г. Бурлаченко, А.С. Буяков, Е.С. Дедова, С.П. Буякова

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

Исследована фазовая эволюция многокомпонентных твердых растворов (Hf,Zr,Ti)C, (Hf,Zr,Nb)C при спекании под давлением эквимоллярных порошковых смесей карбидов металлов. Установлено, что монофазные твердые растворы замещения (Hf,Zr,Ti)C и (Hf,Zr,Nb)C с ГЦК-решеткой образовались при температурах 1700 и 1500 °С соответственно. Показано, что формирование твердых растворов (Hf,Zr,Ti)C и (Hf,Zr,Nb)C протекает в несколько этапов с образованием промежуточных двухкомпонентных керамических твердых растворов (Hf,Zr)C, (Zr,Nb)C, (Ti,Zr)C и их последующим растворением. Физико-механические свойства однофазных многокомпонентных твердых растворов превышают свойства входящих в их состав карбидов металлов. Так, для твердого раствора (Hf,Zr,Ti)C  $E = (518 \pm 47)$  ГПа,  $H = (34 \pm 4)$  ГПа,  $K_{1C} = (3.9 \pm 0.5)$  МПа·м<sup>1/2</sup>, для твердого раствора (Hf,Zr,Nb)C  $E = (513 \pm 46)$  ГПа,  $H = (36 \pm 3)$  ГПа,  $K_{1C} = (4.2 \pm 0.5)$  МПа·м<sup>1/2</sup>.

**Ключевые слова:** фазовая эволюция, карбиды переходных металлов, многокомпонентный твердый раствор, энтропия, механические свойства.

## Введение

Сложившиеся тенденции развития исследований в области создания высокотемпературных материалов свидетельствуют о том, что в настоящее время основное внимание исследователей направлено на керамику и керамические композиты. Высокотемпературная керамика, включающая в себя в том числе карбиды переходных металлов IV–VI групп периодической системы элементов Д.И. Менделеева, является потенциальным кандидатом для разработки теплонагруженных конструкций, эксплуатируемых при температурах выше 2000 °С. Карбиды переходных металлов характеризуются высокой твердостью и прочностью, высокой теплопроводностью и высокой сопротивляемостью коррозионным воздействиям. Их структура сформирована сильной ковалентной связью, которая обеспечивает высокую температуру плавления и низкую диффузию, обуславливающую стабильность свойств при высоких температурах.

В 2004 г. была предложена концепция высокоэнтропийных сплавов [1–3], согласно которой выигрыш в конфигурационной энтропии за счет уменьшения энергии Гиббса способствует формированию одной кристаллической фазы, представляющей из себя неупорядоченный твердый раствор замещения. При этом подавляется образование термодинамически конкурирующих промежуточных соединений. Позднее концепция высокой энтропии была применена к другим системам, в том числе керамикам [4–7]. Энтропийные материалы обычно определяют как многокомпонентные твердые растворы замещения трех и более (но не более 20) подрешеток катионов или анионов с высокой или средней конфигурационной энтропией [2, 3, 8–11].

Твердые растворы, стабилизированные энтропией, характеризуются внутренним атомным беспорядком металлических элементов в положении катиона, что приводит к формированию сложной кристаллической структуры со значительными искажениями решетки. Искажения и термодинамическая стабильность энтропийных твердых растворов обеспечивают высокие физико-механические свойства материалов при повышенных температурах. Развитие энтропийного подхода к формированию многокомпонентных керамических твердых растворов на сегодняшний день является весьма актуальным, так как позволяет существенным образом изменить свойства получаемых материалов. Многокомпонентные керамические твердые растворы, стабилизированные

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проекта № FWRW-2021-0009. Микроскопические исследования проведены на приборе LEO EVO 50 («Zeiss», Германия) в ЦКП «NANOTEX» ИФПМ СО РАН (ЦКП ТНЦ СО РАН).

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>