

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Давдяна Григория Сергеевича
«Исследование объёмных и зернограницных фазовых превращений в сплавах титана при больших деформациях», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Актуальность темы диссертации

Титановые сплавы занимают важное место в современном авиакосмическом, биомедицинском и энергетическом машиностроении благодаря уникальному сочетанию высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и биоинертности. Управление механическими свойствами через фазовый состав и микроструктуру остаётся одной из центральных задач физики конденсированного состояния, а легирование, термическая и классическая механическая обработка уже не всегда позволяют достичь требуемых характеристик. Методы воздействия большой пластической деформацией, в частности кручение под высоким давлением (КВД), открывают принципиально новые возможности для формирования субмикроструктурных и нанокристаллических структур с нестандартным фазовым составом. Отдельную актуальность представляет исследование зернограницных фазовых явлений и метастабильной фазы ω -Ti высокого давления в сплавах с изоморфными β -стабилизаторами, а также в многокомпонентных (так называемых «высокоэнтропийных сплавах» (ВЭС) на основе Ti, Zr, Hf, Mo, Cr — системах, практически не изученных в контексте КВД-обработки.

Научная новизна работы

Автором диссертации впервые изучен зернограницный фазовый переход смачивания в многокомпонентных («высокоэнтропийных») сплавах TiZrHfMoCr и TiZrHfMoCrCo, где зафиксировано смачивание границ зерен фазы Лавеса C15 прослойками ОЦК-фазы вблизи 1000 °С. Установлено, что в субмикроструктурном состоянии сплава Ti-4Fe воздействие большой (в литературе часто называемой «интенсивной») пластической деформацией приводит к смещению фазового равновесия и аномально высокой объемной доле β -Ti фазы. Впервые продемонстрировано, что исходная микроструктура материала определяет радиальную однородность получаемой при КВД структуры. Также обнаружено, что доля образующейся ω -Ti фазы в сплавах с изоморфным β -стабилизатором монотонно снижается по мере роста концентрации легирующего компонента (ванадия).

Практическая значимость работы

В работе предложена оригинальная методика предварительной термической обработки, позволяющая достигать максимального измельчения структуры и радиальной однородности образцов в процессе КВД. Разработан подход к управлению конечным фазовым составом материала через варьирование легирования и параметров термообработки. Кроме того, предложена эффективная методика повышения вязкости разрушения исходно хрупких многокомпонентных сплавов за счет деформационно-индуцированного увеличения объемной доли пластичной ОЦК фазы.

Достоверность

Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечивается использованием комплекса современных аттестованных методов структурного и фазового анализов: просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа. Для квалифицированной оценки механических свойств корректно применены испытания на трехточечный изгиб, измерения микротвердости по Виккерсу и метод наноиндентирования.

Замечания

Отмечая высокий научный уровень работы, по ней имеются следующие замечания:

1. В работе сплавы TiZrHfMoCr и TiZrHfMoCrCo квалифицируются как высокоэнтропийные без термодинамического обоснования. Согласно определению ВЭС [Yeh J.W., Chen Design Concepts and Outcomes. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(5), 299–303.DOI: 10.1002/adem.200300567], энтропийная стабилизация должна обеспечивать преимущественно однофазный твердый раствор, тогда как в исследуемых сплавах зафиксировано многофазное расслоение

(A2, C15, C14). Кроме того, содержание Co (~3,5 ат.%) и Cr (~3,8 ат.%), указанные на странице 7 автореферата, в TiZrHfMoCrCo не удовлетворяет критерию 5–35 ат.% для каждого компонента [Yeh J.W., Design Concepts and Outcomes. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(5), 299–303.DOI: 10.1002/adem.200300567], а расчёт конфигурационной энтропии смешения (порог 1,5R) и верификация критерия $\Omega > 1$ [Yang X., Zhang Y. Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys. Materials Chemistry and Physics, 2012, 132(2–3), 233–238.DOI: 10.1016/j.matchemphys.2011.11.021] в работе отсутствуют. Применение термина «высокоэнтропийный» к системам, минимизирующим энергию Гиббса через фазовое расслоение, требует дополнительного обоснования.

2. В работе не указано, каким именно методом проводился количественный фазовый анализ по результатам рентгеноструктурных исследований. Если использовался упрощённый подход — по интенсивностям отдельных пиков, — то в условиях сильного уширения и наложения рефлексов после КВД такой метод не совсем надёжен для разделения ω -, α - и β -фаз.

3. Требуется дополнительное обоснование интерпретации данных рентгеноструктурного анализа деформированного сплава Ti-4Fe как указывающих на присутствие ω -фазы (количественные данные приведены в Таблице 4.4 на стр. 19). Деформационно-индуцированное ω -превращение при КВД в сплавах Ti-Fe зафиксировано в литературе и само по себе не вызывает сомнений. Однако в деформированном материале со значительным уширением рефлексов альтернативная интерпретация — артефакт перекрытия пиков β (110) и ω (002, 112) — в тексте не рассматривается и не исключается. Ситуацию осложняет отсутствие дифрактограмм в автореферате, что не позволяет оценить корректность разделения фаз. Отсутствие индентирования фаз методом просвечивающей электронной микроскопии не позволяет однозначно разграничить реальное присутствие ω -фазы и артефакт наложения пиков в данном сплаве.

4. Вызывает сомнение универсальность предложенного механизма образования трёхфазной ($\alpha+\beta+\omega$)-структуры, апеллирующего к пересыщенным α -областям как к необходимому условию зарождения ω -фазы. Из данных таблиц 2 и 3 следует, что сплавы Ti-4V, Ti-6V и Ti-8V, представляющие собой однофазную β -матрицу после КВД, также формируют ω -содержащую структуру, хотя обогащённых α -областей в них не зафиксировано. В автореферате не разделяется диффузионно-контролируемый механизм и бездиффузионное деформационно-индуцированное ω -превращение под давлением, в результате чего единый механизм, заявленный в положении 4, требует дополнительного обоснования.

5. Утверждение о том, что характер смачивания на границах зёрен меняется с полного на неполное (или наоборот), требует прямого измерения величины угла смачивания между фазами на границах зёрен. В работе этого не сделано: приведены лишь доля β -фазы по РСА и снимки РЭМ. Без измерений или расчётов поверхностных энергий вывод об «изменении знака» для сплавов TiFe и TiV остаётся под вопросом.

6. В работе отсутствует количественная аттестация параметров микроструктуры (в частности, среднего размера зерна) для многокомпонентных систем TiZrHfMoCr и TiZrHfMoCrCo. В отличие от бинарных сплавов Ti-V и Ti-Fe, для которых в автореферате приведены детальные расчёты эволюции параметров зёрновой структуры, для многокомпонентных сплавов представлены лишь визуальные РЭМ-изображения и данные об объёмных долях фаз (стр. 20–21). Отсутствие прямых данных о размере структурных элементов не позволяет достоверно оценить степень измельчения структуры после КВД-обработки.

7. Недостаточно обоснована методология измерения механических свойств (HIT, EIT, HV) индивидуальных фаз. В тексте не описана процедура прецизионного выбора точек измерения на конкретных фазах для многокомпонентных сплавов и методика статистической обработки данных.

8. Автор считает, что после отжига при 1000°C, 336 ч сплавы TiZrHfMoCr и TiZrHfMoCrCo достигли термодинамического равновесия. Однако для пятикомпонентной системы с высоким содержанием Hf и Mo это ничем не подкреплено: нет CALPHAD-расчёта, нет диаграммы состояния, нет анализа стабилизации фазового состава по времени. Без этих данных нельзя исключить, что наблюдаемое состояние остаётся метастабильным.

Соответствие работы критериям, предъявляемым к диссертациям

Диссертационная работа представляет собой завершенное научное исследование, обладающее несомненной новизной и значимостью. Выявленные замечания носят преимущественно дискуссионный характер и не снижают общую высокую научную ценность полученных экспериментальных результатов и их обсуждения.

Заключение

Диссертационная работа «Исследование объёмных и зернограницных фазовых превращений в сплавах титана при больших деформациях», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС».

Главный научный сотрудник, и.о. зав. лабораторией
физико-химической инженерии
композиционных материалов
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Федеральный исследовательский
центр проблем химической физики и медицинской
химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН),
д. ф.-м. н. по специальности
01.04.07 (Физика конденсированного состояния),
профессор по специальности 01.04.07
(Физика конденсированного состояния)
Телефон: 8(49652)21320
Адрес электронной почты: kolobov@icp.ac.ru






Колобов Юрий Романович

Старший научный сотрудник лаборатории
физико-химической инженерии
композиционных материалов
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Федеральный исследовательский
центр проблем химической физики и медицинской
химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН),
к. т. Н. по специальности 01.04.07
(Физика конденсированного состояния)
Телефон: 8(49652)21941
Адрес электронной почты: manohin@icp.ac.ru



Манохин Сергей Сергеевич

ОТВЕТСТВЕННОРУЧНУЮ ПОДПИСЬ
СОТРУДНИКА 
УДОСТОВЕРЯЮ 
СОТРУДНИК
КАНЦЕЛЯРИИ 

Адрес: 142432, Московская обл., г.о. Черноголовка, г. Черноголовка, проспект академика Семёнова, д. 1

Дата отзыва: 07.05.2026 г.;