

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Михаила Игоревича Разумовского на тему «Диффузия в системах тугоплавких металлов с ОЦК решёткой: Ti / Ti-Zr-Hf-Ta-Nb-Mo и Ti / Ta» представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. «физика конденсированного состояния»

Диссертация М.И. Разумовского посвящена проблеме диффузионной устойчивости высокоэнтропийного сплава (ВЭС) Ti-Zr-Hf-Ta-Nb-Mo, композиция которого состоит из шести тугоплавких металлов с ОЦК решеткой. В этой работе в системе Ti/ВЭС методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА, electron probe analysis) были получены концентрационные распределения всех шести компонентов ВЭС после диффузионного отжига при 1473, 1573 и 1673 К. Кроме этого была изучена диффузия в паре Ti/Ta, которая служила в качестве образца-свидетеля. Поскольку в настоящее время ВЭС на основе тугоплавких металлов с ОЦК решеткой рассматриваются как перспективные матрицы для создания жаропрочных сплавов, способных к эксплуатации при повышенных по сравнению с традиционными жаропрочными никелевыми сплавами температурах, то данная тема является актуальной. Обработка концентрационных кривых методами Мотано и Хэлла позволила определить парциальные коэффициенты диффузии и параметры уравнения Аррениуса для всех компонентов ВЭС, что дало основание для сравнительного анализа диффузионной подвижности атомов в ВЭС и в чистых металлах. Основным экспериментальный результат работы – это установленный факт более высокой скорости диффузии атомов некоторых элементов композиции ВЭС (Mo, Ta и Nb) по сравнению со скоростью самодиффузии в чистых металлах. То есть имеет место нарушение известного положения (сформулированного для металлов с ГЦК решеткой), утверждающего, что диффузионная подвижность атомов компонентов в ВЭС снижается. Полученный результат является абсолютно новым.

Работа выполнена на хорошем экспериментальном уровне с использованием современных аналитических методов таких как МРСА и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДРС, energy dispersive X-ray spectroscopy), которая в данной работе использовалась для качественного анализа области сварки диффузионных пар. Использование современных аналитических методов: МРСА и ЭДРС, а также грамотное использование методов Мотано и Хэлла для определения парциальных коэффициентов диффузии всех компонентов ВЭС, указывают на высокую квалификацию диссертанта и свидетельствуют о надежности полученных им результатов.

Обнаруженный экспериментальный факт склонности некоторых компонентов ВЭС (Мо, Та, Nb) к более интенсивному диффузионному перемещению в матрице по сравнению с самодиффузией в чистых металлах заслуживает особого внимания. Обнаружение этого явления потребует дальнейшего поиска и обоснования новых (дополнительных по отношению к уже имеющимся) критериев отбора компонентов для ВЭС, особенно при создании ВЭС на основе тугоплавких ОЦК металлов. Это обстоятельство свидетельствует о перспективности данного направления исследований.

По автореферату диссертации необходимо сделать замечание, касающееся использования метода МРСА. В автореферате не указаны условия работы рентгеновского микроанализатора, не указана линия характеристического рентгеновского излучения, которая была использована, отсутствует анализ композиции сплава с точки зрения эффективности вводимых программным обеспечением рентгеновского анализатора поправок на рентгеновское излучение для определения концентрации компонентов ВЭС. В связи с явлением вторичной флуоресценции, возникающей в более легких элементах в окружении тяжелых, определение методом МРСА концентрации в многокомпонентном сплаве, состоящим из элементов с сильно различающимися атомными весами (варьирующимися от 47.87 а.е.м. для Ti до 180.95 а.е.м. для Та), да еще в случае, когда количество компонентов сплава равно шести, представляет собой нетривиальную задачу. Поскольку атомные веса компонентов сплава сильно разнятся, то и условия возбуждения различных линий характеристического рентгеновского излучения для разных компонентов ВЭС будут разные не только из-за разной величины потенциала возбуждения той или иной линии характеристического рентгеновского излучения в данном компоненте сплава, но и из-за эффекта вторичной флуоресценции. Рентгеновские поправки на вторичную флуоресценцию и их численные значения различны для разных компонентов ВЭС (для Та соответствующая рентгеновская поправка вообще отсутствует), поэтому представляется полезной (и необходимой) предварительная «градуировка» компонентов ВЭС относительно чувствительности МРСА к определению той или иной концентрации. Такой анализ композиции с целью повышения надежности в определении концентрации компонентов ВЭС позволил бы обоснованно выбрать наиболее устойчивую к воздействию вторичной флуоресценции линию характеристического рентгеновского излучения или, может быть, указал на необходимость использовать две характеристические линии, что было бы с моей точки зрения, учитывая сложный состав ВЭС, совсем не лишним. Имеющегося в автореферате замечания общего характера, что чувствительность МРСА составляет величину порядка 1.0 ат. %, в данном случае явно недостаточно.

Сделанное замечание, однако, не может изменить общего положительного впечатления от диссертации, основным достижением которой является, во-первых, получение набора диффузионных констант в виде парциальных коэффициентов диффузии химических элементов многокомпонентного ВЭС на основе тугоплавких металлов с ОЦК решеткой, и во-вторых, обнаружение эффекта превышения значений парциальных коэффициентов диффузии таких компонентов ВЭС как Mo, Ta и Nb над коэффициентами самодиффузии этих элементов в чистых металлах, т.е. обнаружение эффекта противоположного тому, что имеет место в ВЭС, основанных на металлах с ГЦК решеткой.

Диссертация М.И. Разумовского «Диффузия в системах тугоплавких металлов с ОЦК решёткой: Ti / Ti-Zr-Hf-Ta-Nb-Mo и Ti / Ta», посвященная проблеме диффузионной устойчивости компонентов высокоэнтропийного сплава, основанного на композиции, состоящей из шести тугоплавких металлов, соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. «физика конденсированного состояния», а ее автор, Михаил Игоревич Разумовский, заслуживает присуждения искомой степени.

Главный научный сотрудник Института
сверхвысокочастотной полупроводниковой
электроники им. В.Г. Мокерова РАН
доктор физико-математических наук



А.Н. Алёшин

Подпись А.Н. Алёшина заверяю
Ученый секретарь ИСВЧПЭ им. В.Г. Мокерова РАН
к.ф.-м.н., доцент



Р.А. Хабибуллин

05.11.2024