ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/281

**СТРУКТУРА БЛИЖНЕГО И СРЕДНЕГО ПОРЯДКА В АМОРФНОМ Ti-Ni-Ta
ПОВЕРХНОСТНОМ СПЛАВЕ ПОСЛЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА,
ИССЛЕДОВАННАЯ МЕТОДАМИ ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ
МИКРОСКОПИИ**

¹Семин В. О., ^{1,2}Мухамедова Р. Р., ^{1,2}Мейснер Л. Л., ³Ротштейн В. П.

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

²*Томский государственный университет, Томск*

³*Томский государственный педагогический университет, Томск*

Получение металлических стекол и аморфно-нанокристаллических композитов является актуальной задачей в инженерных приложениях, в которых важно обеспечить высокий уровень механических и функциональных свойств. Ввиду того, что металлические стекла метастабильны, под действием деформационных или термических воздействий в них могут формироваться нанокомпозитные структуры, обладающие высокой пластичностью. Перспективной представляется возможность управления процессами кристаллизации аморфных сплавов с целью обеспечения в них высокой плотности нанокристаллических частиц (до 10^{24} м⁻³). Макроскопическая пластичность и процессы термически индуцированного охрупчивания в аморфно-нанокристаллических композитах обусловлены структурными изменениями, происходящими в аморфной матрице в процессе нагрева. Целью работы являлось исследование закономерностей изменения структуры ближнего и среднего порядка в аморфном Ti-Ni-Ta поверхностном сплаве при низкотемпературном отжиге на наномасштабном уровне.

Формирование Ti-Ni-Ta поверхностного сплава осуществлялось электронно-пучковым способом на модифицированной установке РИТМ-СП («Микросплав», Россия) по методике, описанной в работе [1]. Отжиг образцов производился в вакууме ($P = 1 \cdot 10^{-5}$ мБар) при температуре 573 К в течение 10 минут с последующим медленным охлаждением в печи. Микроструктурные исследования поверхностного слоя образцов проводились на оборудовании центров коллективного пользования «Нанотех» ИФПМ СО РАН и НИ ТПУ. Электронно-микроскопические исследования в режимах светлого, темного полей, микро- и нанодифракции проводились методом тонких фольг на просвечивающих электронных микроскопах JEM-2100 (JEOL, Япония) и JEM-2100F (JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Фольги для ПЭМ готовились методом ионного травления на установке EM 09100IS (JEOL, Япония). Анализ нанодифракционных картин осуществлялся методом функций радиального распределения атомов (ФРРА) с помощью программного обеспечения SuePDF software [2]. Состав аморфной матрицы определялся с помощью энергодисперсионного спектрометра INCA Energy (Oxford Instruments, Великобритания), установленного на просвечивающем электронном микроскопе. Для того, чтобы исключить влияние высокочастотного шума на больших углах рассеяния, диапазон векторов рассеяния электронов был ограничен до 12 нм^{-1} . Для калибровки постоянной прибора λL использовали эталонные реплики из золота.

По результатам ПЭМ-анализа установлено, что в исходном состоянии (до отжига) Ti-Ni-Ta поверхностный сплав характеризуется аморфно-нанокристаллической структурой. На нанодифракционных картинах вблизи диффузных гало от аморфной фазы наблюдались менее интенсивные точечные брэгговские отражения от нанокристаллических ($d < 50$ нм) частиц β -фазы (Ti, Ta) с ОЦК решеткой. После низкотемпературного отжига при 573 К (10 минут) кристаллизации аморфной фазы не наблюдалось.

Считается, что отжиг аморфных материалов при температурах, лежащих ниже температуры стеклования, сопровождается процессами структурной релаксации. Для исследований структуры ближнего порядка в аморфной матрице до и после отжига были построены ФРРА по данным, как минимум, трех нанодифракционных картин (рис. 1). Из рис. 1 хорошо заметно, что аморфное состояние до и после отжига характеризуется высокой

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

степенью атомного среднего порядка (СП) с характерным радиусом $r_{\text{СП}} \sim 12 \div 14 \text{ \AA}$. При этом межатомные расстояния на первой координационной сфере в обоих случаях хорошо аппроксимируются единственной функцией Гаусса и приходятся на $r^1 = 2.80 \div 2.86 \text{ \AA}$ (рис. 1). В результате отжига расщепление второго и третьего максимумов вблизи $r^2 \sim 4.85 \text{ \AA}$ и $r^3 \sim 7.30 \text{ \AA}$ становится менее выраженным. Можно предположить, что в процессе структурной релаксации сформировалась более упорядоченная структура атомного среднего порядка, характеризующаяся более плотной упаковкой.

Рис. 1. ФРРА $G(r)$ до и после низкотемпературного отжига в Ti-Ni-Ta поверхностном сплаве. Максимумы на $G(r)$, соответствующие первым трем координационным сферам, отмечены стрелками.

Авторы выражают благодарность научным сотрудникам ИСЭ СО РАН А. Б. Маркову, Г. Е. Озуру, Е. В. Яковлеву за организацию и проведение поверхностных обработок исследованных материалов.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект III.23.2.1). Электронно-пучковая обработка поверхности образцов и многокомпонентное легирование поверхностного слоя TiNi сплава выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 18-19-00198 (от 26.04.2018 г.).

1. Microstructural characterization of Ti-Ta-based surface alloy fabricated on TiNi SMA by additive pulsed electron-beam melting of film/substrate system / L. L. Meisner [et al.] // J. Alloys Comp. 2018. Vol. 730. P. 376–385.
2. SUEPDF: a program to obtain quantitative pair distribution functions from electron diffraction data / D. T. Tran, G. Svensson, C.-W. Tai // J. Appl. Crystal. 2017. Vol. 50. P. 304–312.