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»

Томск
Издательский Дом ТГУ
2019

DOI: 10.17223/9785946218412/259

**ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ
КОМПОЗИЦИЙ С ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ИЗ
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ**

Бледнова Ж.М., Русинов П.О.

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

Наблюдающийся в настоящее время стремительный мировой рост исследований высокоэнтропийных материалов (ВЭМ) объясняется их высокими прочностными свойствами по сравнению с традиционными материалами в условиях температур от криогенных до повышенных, высокой усталостной и ударной прочностью, стойкостью к истиранию и широкими функциональными возможностями, среди которых экспериментально подтвержденный термически, деформационно- и магнитно-управляемый эффект памяти формы (ЭПФ) [1]. Недавно учеными института материаловедения НАН Украины (2013-2015 г.) было обнаружено [2], что для высокоэнтропийного сплава $Ti_{16.66}Zr_{16.67}Hf_{16.66}Co_{10}Ni_{25}Cu_{15}$ мартенситные превращения сопровождаются эффектом памяти формы с полным восстановлением при повышенных температурах, что дает основание рассматривать ВЭС $TiZrHfCoNiCu$ перспективными для поверхностного модифицирования. Привлекательность этих материалов для технических применений объясняется их многофункциональностью, как при нормальных, так и при повышенных температурах: высокой демпфирующей способностью, сверхэластичностью. Высокоэнтропийные сплавы проявляют исключительное сопротивление к росту зерен, что позволяет получать наноструктурированные слои на их основе.

Ранее нами разработаны и реализованы технологии формирования многослойных наноструктурированных поверхностных композиций из трех- и четырехкомпонентных материалов с ЭПФ с иерархической структурой с градиентом свойств и фазовых состояний для повышения эксплуатационных свойств и жизненного цикла изделий [3]. Для формирования поверхностных композиций из ВЭС-ов наиболее эффективны комплексные высокоэнергетические способы обработки. Нами использовалось технология высокоскоростное газопламенное напыление (ВГН) механически активированных порошков ВЭС-ов, а в случае повышенных требований к износу и сроку службы в сочетании с высокоэнтропийной керамикой (ВЭК), в том числе с эффектом памяти формы. В табл. 1 приведены результаты рентгеноструктурного и электронномикроскопического исследования пяти вариантов поверхностных слоев из ВЭС-ов $CoCuTiZrHf$, $NiCoTiZrHf$, $NiCuTiZrHf$, $ZrCuNiCoTi$, $TiNiZrHfCoCu$. Все покрытия содержат в различных комбинациях 5-6 металлов Ti, Ni, Zr, Hf, Co, Cu, которые исследованы нами ранее в составе трехкомпонентных и четырехкомпонентных ($TiNiCu$, $TiNiCo$, $TiNiZr$, $TiNiHf$, $TiNiHfCu$). Оценка размеров зерен показала, что структура покрытий, в основном, ультрамелкозернистая 100-400 нм, в некоторых слоях наноразмерная, менее 100 нм, фазовый состав характерный для материалов с ЭПФ, содержит фазы B2, B19.

Для прогнозирования деформационного поведения (накопления повреждений и разрушения) поверхностных слоев из высокоэнтропийных материалов с ЭПФ использовался энергетический критерий, основанный на аналогии деформирования, разрушения и плавления, основными параметрами которого является энергоемкость материала и структурный фактор сплава. Расчет энергоемкости многокомпонентных систем из материалов с ЭПФ осуществлялся по результатам рентгеноструктурного анализа с учетом термодинамических характеристик и диаграммы состояния систем. Структурный фактор сплава определялся на основе количественного анализа методом мультифрактальной параметризации структуры. Для приведенных в табл. 1 ВЭС-ов выполнен расчет повреждаемости, показывающий удовлетворительную сходимость с экспериментальными результатами усталостных испытаний образцов с поверхностным слоем из ВЭС-ов с ЭПФ.

В статье рассмотрен принцип формирования многофункциональных поверхностных

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

композиций «основа – адгезионный слой – интеллектуальный слой из многокомпонентных материалов с ЭПФ - функциональный защитный и износостойкий слой из ВЭК», реализованных на запатентованном оборудовании в защитной среде (пат. № 2475567, 2502829, 2402628).

Таблица 1. Результаты исследования покрытий из высокоэнтропийных материалов с ЭПФ

Рентгенограмма слоя из материала с ЭПФ	Микроструктура	Размер зерна
<p>Co17.6Cu18.8Ti9.6Zr18.3Hf35.7 × 80000</p>		<p>d = 100-350 nm</p>
<p>Ni17.8Co17.7Ti9.8Zr18.6Hf36, × 65000</p>		<p>d = 80-310 nm</p>
<p>Ni17.6Cu18.8Ti9.6Zr18.3Hf35.7 × 80000</p>		<p>d = 100-240 nm</p>
<p>Zr52.8Cu26Ni8.8Co8.4Ti4 × 25000</p>		<p>d = 120-240 nm</p>
<p>Ni17.8Co17.7Ti9.8Zr18.6Hf36.1 × 80000</p>		<p>d = 120-240 nm</p>

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту № 19-19-00331.

1. Michael C. Gao, Daniel B. Miracle, David Maurice, Xuehui Yan, Yong Zhang, Jeffrey A. Hawk. High-entropy functional materials. Journal of Materials Research. September 2018, pp. 1-18.
2. Firstov G.S., Kosorukova T.A., Koval Y.N., Odnosum V.V. High entropy shape memory alloys. Mater Today: Proceedings Materials Today: Proceedings 2S (2015). p.499–504.
3. Blednova Zh.M., Makhutov N.A., Rusinov P.O. Mechanical and tribological properties of “substrate-material” multifunctional composite with shape memory effect. Inorganic Materials. 2016. V. 52, 15, pp. 1489-1497.