ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика.

**Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»,**

**посвященная 90-летию со дня рождения
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН
академика Виктора Евгеньевича Панина**

в рамках

**Международного междисциплинарного симпозиума
«Иерархические материалы: разработка и приложения
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года
Томск, Россия**

Томск
Издательство ТГУ
2020

DOI: 10.17223/9785946219242/382

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ
ПОВЕРХНОСТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ТЕРМОУПРУГИМИ
МАРТЕНСИТНЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ**

Русинов П.О., Бледнова Ж.М., Курапов Г.В.

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

Формирование поверхностных слоев производилось путем высокоскоростного газопламенного напыления (ВГН) механоактивированного порошка в защитной атмосфере (среда аргона) из высокоэнтропийного материала Zr-Nb-Ti-Ta-Hf с термоупругими мартенситными превращениями (ТМП). В качестве материала для напыления использовали механоактивированные порошки Zr-Nb-Ti-Ta-Hf (Zr10Nb24Ti7Ta47Hf12). В качестве основы использовалась сталь 45. Процесс ВГН осуществлялся на модернизированной установке GLC (патент № 2535432, решение о выдаче патента № 2019137463), снабженной вакуумной камерой, устройством для перемещения газопламенной горелки ВГН, технологическим модулем для ионной очистки поверхностей деталей, устройством подачи жидкого азота, системы подачи газов, устройством для проведения поверхностно-пластического деформирования (ППД) покрытия. Предложенная модернизация установки GLC для ВГН (рис.1), позволяет осуществлять комплексный термомеханический цикл обработки, включающий последующую поэтапную термомеханическую обработку (Пат. № 2502829) после напыления.

Рис. 1. Модернизированная вакуумная установка GLC для получения композиционных покрытий из материалов с ТУФП в защитной атмосфере (аргон) (а): 1 – блок управления; 2 – источник питания; 3 – сварочный трансформатор; 4 – патрон; 5- трехроlikовое приспособление для ППД полученного покрытия; 6 – газопламенная горелка для ВГН; 7 – устройство для перемещения газопламенной горелки; 8 – устройство для подачи жидкого азота; 9 – порошковый дозатор; 10 – пирометр для измерения температуры; 11 – система подачи газов; 12 – задняя бабка; 13 – электродвигатель; 14 – шкивы для передачи крутящего момента от электродвигателя 13 на патрон 4; 15 – рама; 16 –обрабатываемая деталь; 17 – вакуумная камера; 19 – вакуумный насос; 20 – технологический модуль для ионной очистки поверхностей деталей 16; 21 – смотровые окна; схема установки (б)

Напыление слоев производится газопламенной горелкой 6, расположенной под углом 40-90°. На обрабатываемой детали устанавливается приспособление 8 для подачи жидкого азота с целью охлаждения детали с композиционным покрытием из материалов с ТМП в случае отрицательных температур фазовых превращений полученного покрытия. ППД после ВГН осуществляется в два этапа: на первом этапе в интервале температур 1073-1273 К, на втором – в интервале температур мартенситных превращений (M_s - M_f). В случае охлаждения детали с покрытием из сплава с ТМП после ВГН до температуры менее 1073 К для разогрева детали до указанной температуры используется сварочный трансформатор 3 [1].

Секция 12. Разработка оборудования для формирования материалов с иерархически организованной структурой и приборов для исследования их структуры, свойств и деформационного поведения

Все вышеописанные технологии получения композиционных покрытий из материалов с ТМП, реализованные в условиях высокоэнергетических воздействий, обеспечили формирование наноразмерной структуры. Одним из важных этапов обеспечения повышенных свойств порошковых покрытий является предварительная механоактивация напыляемого материала, включающая стадии высокоскоростного деформирования, полигонизации и рекристаллизации. Для механической активации и измельчения порошка (Zr-Nb-Ti-Ta-Hf) использовали шаровую мельницу ГЕФЕСТ – 2 (АГО-2У). Толщина покрытия составила 1 мм.

При комнатной температуре основная структурная составляющая поверхностного слоя Zr-Nb-Ti-Ta-Hf слоя после ВГН в защитной атмосфере – аустенитная фаза с кубической решеткой, также в покрытии присутствует мартенситные фазы B19' с моноклинной решеткой, фаза NbTi4 с ромбической решеткой, фаза ZrHf с гексагональной решеткой, фаза NbTa с кубической решеткой, фаза NbZr с кубической решеткой, фаза TiHf с гексагональной решеткой, фаза TiZr с гексагональной решеткой, фаза TiO с тетрагональной решеткой, оксида титана (TiO) менее 1%.

Как показал металлографический анализ, структура формируемых в результате ВГН механоактивированного порошка слоев сплава Zr-Nb-Ti-Ta-Hf имеет крайне слабую травимость обычными реактивами вследствие сильного измельчения зерна в результате высокой скорости соударения частиц с подложкой и высокой скорости их охлаждения (рис.2а). Исследования микроструктуры поверхностного слоя Zr-Nb-Ti-Ta-Hf показало, что слой имеет наноразмерную структуру с размером зерна 30-120 нм (рис.2б). Во многом образование такого покрытия связано с особенностями ВГН.

Рис. 2. Микроструктура покрытия Zr-Nb-Ti-Ta-Hf полученного высокоскоростным газопламенным напылением механически активированного порошка в защитной атмосфере $\times 1000$ – а) $\times 70000$ – б)

В ходе калориметрических исследований покрытия из сплава Zr-Nb-Ti-Ta-Hf после HVOF с последующей термической обработкой, наблюдается проявление экзо эффекта. Распределение микротвердости по толщине покрытия Zr-Nb-Ti-Ta-Hf неравномерное, находится в интервале 312-452 кг/мм² (после HVOF в защитной атмосфере); 296-356 кг/мм² (после HVOF в защитной атмосфере с последующей термической обработкой).

Заключение. Разработана конструкция установки и отработана технология получения покрытий из высокоэнтропийных сплавов с ТМП; выполнено исследование структуры и свойств композиции Zr-Nb-Ti-Ta-Hf и пути их оптимизации с целью повышения эксплуатационных свойств. Технология создания композиции «сталь – материал с ТМП», осуществляемая в условиях высокоэнергетических воздействий, обеспечивающих формирование наноразмерной структуры, включает подготовку поверхности, измельчение и механическую активацию наносимого материала, измельчение функционального слоя, характеризуются технологической новизной и защищена патентами. На основе комплексных рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследований выявлены закономерности формирования наноразмерного состояния композиции.

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