

ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ Ti-Ni-Hf ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ И ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Русинов П.О., Бледнова Ж.М.

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»
г. Краснодар, Россия, E-mail: ruspiter5@mail.ru

Одной из главных особенностей современных наукоемких технологий является стремление создавать и использовать новые материалы, обладающие, помимо уникальных сочетаний механических, физических и других свойств, способностями активно реагировать на изменение внешних условий или внешнее воздействие (интеллектуальные материалы). К числу таких материалов относятся, в первую очередь, сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) [1,2]. Уникальное сочетание функциональных свойств памяти с высокими механическими характеристиками нашли широкое практическое применение при создании изделий, стабильно работающих в условиях длительного механоциклирования, коррозионных сред, ударных воздействий и интенсивного изнашивания, с возможностью обратимого формоизменения [3–5]. Непосредственное использование сплавов с ЭПФ в качестве конструкционных материалов в машиностроении хотя и открывает широкие возможности, но является дорогостоящим. Этот недостаток может быть компенсирован созданием новых экономичных технологий формирования поверхностных слоев из сплавов с ЭПФ [5].

Целью настоящей работы является повышение функционально-механических свойств стальных изделий путем создания наноструктурного состояния в покрытии из материала с эффектом памяти формы высокоскоростным газопламенным напылением механически активированного порошка TiNiHf.

Методика эксперимента. Для формирования поверхностных слоев TiNiHf на стали использовалась технология высокоскоростного газопламенного напыления механически активированных порошков марок ПН37Т18ГФ45 и ПНК1–ВЛ7. Напыление ПН37Т18ГФ45 осуществляли через промежуточный слой чистого никеля Ni ($\delta=100$ мкм), обеспечивающего прочную связь на границе сталь – TiNiHf, на цилиндрических ($\varnothing 10$ мм, сталь 45) образцах. Общая толщина слоя варьировалась в пределах 0,4–0,5 мм.

Порошки Ni, TiNiHf марок ПНК1–ВЛ7, ПН37Т18ГФ45 для высокоскоростного газопламенного напыления подвергались механической активации в высокоскоростной планетарной шаровой мельнице АГО–2У, частота вращения барабана 1200 мин^{–1}, частота вращения водила 900 мин^{–1}, диаметр стальных шаров 6 мм, время работы 10–30 мин.

В процессе механической активации порошка ПН37Т18ГФ45 происходит его дробление и пластическое деформирование. Частицы порошка ПН37Т18ГФ45 до механической активации имели размер 40–60 мкм, после механической активации имеют размер от 0,1 до 3 мкм, с наночастицами (рис.1).

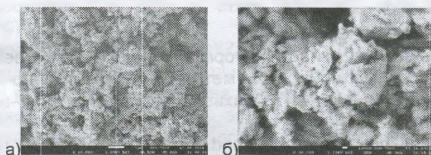


Рисунок 1 – Порошок ПН37Т18ГФ45 механически активированный в атриторе в течение 30 мин, $\times 10000$ – а); $\times 30000$ – б)

Высокоскоростное газопламенное напыление осуществлялась на модернизированной универсальной плазменной установке GLC–720, в защитной среде (аргон). В результате отработки технологического процесса и статистической обработки технологических параметров установлены оптимальные режимы высокоскоростного газопламенного напыления материалов с эффектом памяти формы

TiNiHf: расход пропана 60–85 л/мин, кислорода 120–160 л/мин, расход порошка 190–210 г/мин, транспортирующего газа (аргон) 40–50 л/мин, угол напыления 70°, скорость перемещения горелки 0,2–0,3 м/мин, скорость вращения покрываемой детали 500 об/мин, дистанция напыления 300 мм.

Поверхностный слой TiNiHf поэтапно подвергали полному термомеханическому циклу обработки, включающему механическую, термическую и комбинированную термомеханическую обработки.

После напыления и механической обработки в размер, проводился вакуумный отжиг образцов: сталь+TiNiHf при $T=1073\text{K}$ в течение 1 ч. Для придания поверхностному слою необходимых функционально–механических свойств его подвергали термомеханической обработке методом поверхностного пластического деформирования.

Структурно–механические особенности формирования поверхностных слоев из сплава с эффектом памяти формы. В результате высокоскоростного газопламенного напыления механически активированных порошков образуется наноразмерное покрытие (рис. 2) с минимальным содержанием пор, пор менее 1%, увеличивается прочность сцепления покрытия с основой (110–120 МПа).

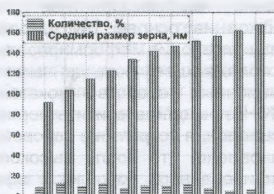


Рисунок 2 – Количественное распределение размера зерен и их процентного содержания в покрытии TiNiHf

Результаты рентгенофазового анализа показали, что при комнатной температуре исходное фазовое состояние слоя TiNiHf после высокоскоростного газопламенного напыления механически активированного порошка представляет собой аустенитные B2–фазы с кубической решеткой, мартенситные фазы B19' с моноклинной решеткой, интерметаллидные фазы Ti2Ni с кубической решеткой, поликристаллическая фаза Hf2Ni, а также наблюдается небольшое количество оксида титана (TiO) и HfO2 менее 3%.

Структура напыленного слоя TiNiHf имеет крайне слабую травимось обычными реактивами, что во многом объясняется сильным измельчением зерна в результате высокоскоростного нагрева, быстрого охлаждения, и значительной деформации (рис. 3), что обеспечивает особые структурные эффекты. В связи с характерными особенностями высокоскоростного газопламенного напыления механически активированного порошка (высокая скорость охлаждения и быстрая закалка покрытия) при напылении в поперечном разрезе слоя TiNiHf отсутствуют четко выраженные столбчатые дендриты, структура может быть охарактеризована как нанокристаллическая. Микротвердость TiNiHf–слоя колеблется в пределах $H_v=9,7+12,6$ ГПа.



Рисунок 3 – Наноструктурированное TiNiHf покрытие, полученное высокоскоростным газопламенным напылением механически активированного порошка: $\times 2500$ – а); $\times 20000$ – б); $\times 100000$ – в)

В настоящей работе, как показали испытания образцов (сталь 45 + TiNiHf) на многоцикловую усталость при изгибе с вращением, наблюдается повышение долговечности. Предел выносливости (σ_{-1}) стали 45 без покрытия составил 275 МПа, а после поверхностного модифицирования сплавом с эффектом памяти формы TiNiHf – 435 МПа (увеличился на 36,8%).

Повышение долговечности образцов с наноструктурированным поверхностным слоем TiNiHf объясняется как особенностями разрушения наноструктурированных материалов, заключающимися в торможении разрушения на границах зерен, препятствии ветвлению и движению трещин вследствие упрочнения границ, так и псевдоупругостью поверхностного слоя TiNiHf, присущей материалам с эффектом памяти формы. Накопленная поверхностным слоем деформация способна восстанавливаться в процессе циклической разгрузки и, таким образом, не накапливаться в материале, что повышает его долговечность.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что комплексный метод формирования поверхностно-модифицированных слоев из материалов с эффектом памяти формы, включающий высокоскоростное газопламенное напыление механоактивированных порошков на основе TiNiHf, последующую термическую и термомеханическую обработку позволил сформировать в поверхностных слоях наноразмерное состояние, обладающее повышенным уровнем функциональных, механических и эксплуатационных свойств; показано, что предварительная механоактивация порошка TiNiHf позволила снизить пористость покрытий (пор менее 1%) и обеспечить прочность сцепления покрытия с основой (110–120 МПа).

Экспериментально установлено, что после высокоскоростного газопламенного напыления механически активированного порошка с эффектом памяти формы на основе TiNiHf циклическая долговечность в условиях многоциклового усталости увеличивается на ~37%.

Работа выполнена по проекту № 9.555.2014/К в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и гранта Президента РФ № МК–5445.2016.8.

Список литературы:

1. Хачин В.Н., Пушин В.Г., Кондратьев В.В.. Никелид титана: Структура и свойства. – М.: Наука, 1992. – 161 с.
2. Otsuka K., Kakeshita T. Science and technology of shape–memory alloys: new developments //mrs bulletin. 2002. – p. 91–98.
3. Материалы с эффектом памяти формы: Справ. изд. / Под ред. Лихачева В.А. – Т. 1. – СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1997. – 424 с.
4. Duering T.W. et all. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. – London: Bittenworth–Heinemann, 1990. – p. 499.
5. Бледнова Ж.М., Махутов Н.А., Чаевский М.И., Поверхностное модифицирование материалами с эффектом памяти формы. Краснодар: Издательский дом–ЮГ. – 354 с.