

**ВЛИЯНИЕ СО НА СТРУКТУРУ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА  
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ TiNi, ПОЛУЧЕННЫХ  
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ**

**Русинов П.О., Бледнова Ж.М.**

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

Сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) отличаются комплексом важных характеристик: высокой прочностью, уникальными по величине эффектами одно- и многократнообратимой термомеханической памяти, высоким уровнем реактивных напряжений, восстановления и демпфирования, высокой коррозионной стойкостью и циклической долговечностью. Все это делает их незаменимыми, несмотря на высокую стоимость, и обуславливает эффективное практическое применение в качестве функциональных материалов нового поколения. Однако, несмотря на все преимущества, высокая стоимость сплава ограничивает их применение в машиностроении. В этих условиях актуальным становится направление, связанное с методами поверхностного модифицирования сталей материалами с ЭПФ. Формирование покрытий из материалов с ЭПФ в настоящее время осуществляется различными способами высокоэнергетических воздействий (аргонно-дуговая, лазерная наплавка с местной защитой, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, термический перенос масс, различные вакуумно-плазменные методы) [1-3]. Среди сплавов с эффектом памяти формы, Ti-Ni-Co позиционируется как низкотемпературный сплав с ЭПФ, он является одним из наиболее перспективных сплавов из-за его более низких температур мартенситных превращений и низкой стоимости. При добавлении Co в сплавы Ti-Ni часть атомов Ni замещается атомами Co, в результате улучшаются сверхупругие свойства сплавов Ti-Ni. Температура  $M_s$  и предел текучести сплавов Ti-Ni-Co, выше, чем у бинарных сплавов Ti-Ni [4, 5]. Таким образом, сплавы Ti-Ni-Co являются перспективными при использовании их в машиностроении.

В качестве источников тепловой энергии в настоящей работе использована газопламенная струя. Выбор этого источника тепловой энергии объясняется возможностью формирования наноструктуры за счет исключительно малого времени взаимодействия с обрабатываемой поверхностью, то есть больших скоростей нагрева и охлаждения основного металла. Так, поверхность подложки под покрытием в слое, глубиной до 1 мкм, нагревается приблизительно на 200°C за 0.01 нс, после чего остывает до исходной температуры металла 1,0 нс.

Целью настоящей работы является исследование структуры и функциональных свойств поверхностных слоев из материалов на основе Ti-Ni-Co, полученных высокоскоростным газопламенным напылением механически активированного порошка и последующей поэтапной термомеханической обработки.

Напыления проводилось на стали 45, 08X14НДЛ. Высокоскоростное газопламенное напыление механоактивированного порошка следующего состава Ti-48,7%at.Ni-1,3%at.Co производилась на универсальной установке GLC-720 в среде аргона на цилиндрические образцы ( $\varnothing 10 \times 50$  мм).

При комнатной температуре основные структурные составляющие поверхностного слоя TiNiCo – аустенитная B2-фаза с кубической решеткой, мартенситные фазы B19' с моноклинной решеткой, фаза Ti<sub>2</sub>Ni с кубической решеткой, фаза Ni<sub>3</sub>Ti с гексагональной решеткой, фаза Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub> с ромбоэдрической решеткой, а также наблюдается небольшое количество оксида титана (TiO) менее 2% (рис.1в).

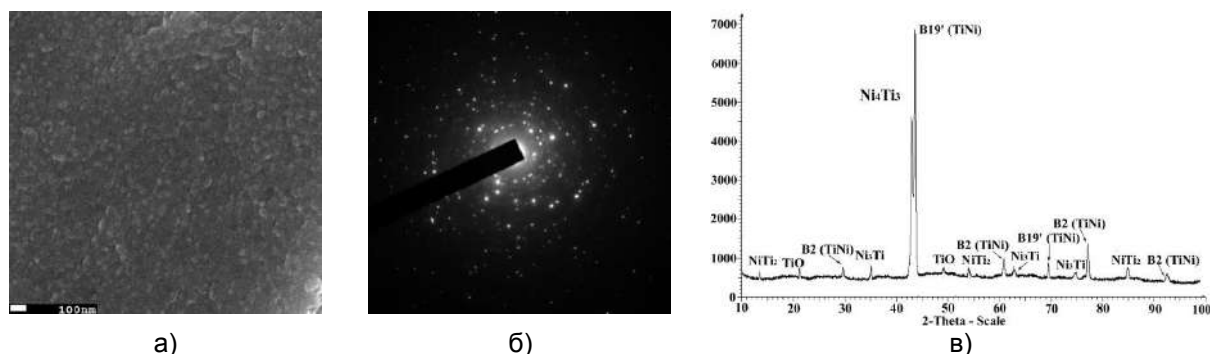


Рисунок 1 – Наноразмерное TiNiCo покрытие, полученное ВГН в защитной атмосфере,  $\times 150\,000$  – а); микроэлектроннограмма покрытия TiNiCo - б); рентгенофазовый анализ покрытия TiNiCo – в)

Полученное TiNiCo покрытие имеет наноразмерную структуру с размером зерна 30-190нм (рис.1а). Во многом образование такого покрытия связано с особенностями высокоскоростного газопламенного напыления (высокая скорость соударения частиц с подложкой, высокая скорость их охлаждения и быстрая закалка сплава).

Для устранения дефектов покрытий TiNiCo, полученных в результате ВГН механоактивированного порошка, проводилась термическая обработка (отжиг при температуре 1073К в течение 1ч в среде аргона). Далее осуществлялось поверхностно-пластическое деформирование полученного покрытия TiNiCo (слой толщиной 1мм). Поверхностно-пластическое деформирование осуществлялось обкаткой поверхностей цилиндрических образцов из стали 45 и 08Х14НДЛ со слоями с ЭПФ TiNiCo. После поверхностно-пластического деформирования и термоциклирования получается однородная наноразмерная структура слоя TiNiCo с размером зерна порядка 80-200нм (рис.2а).

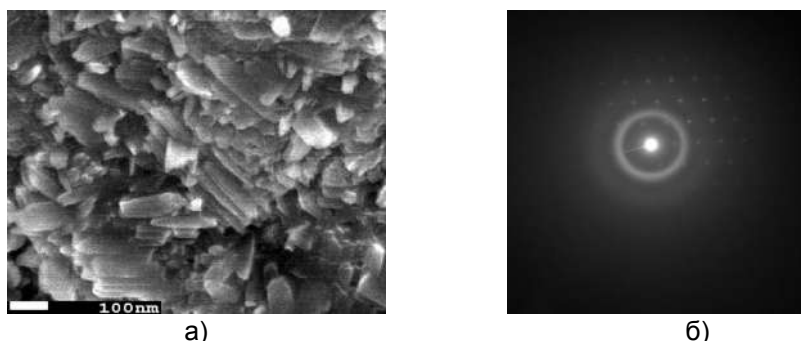


Рисунок 2 – Микроструктуры слоя сплава TiNiCo после термомеханической обработки с обкаткой: структура аустенитной B2 фазы  $\times 45\,000$  – а); мартенситной фазы B19',  $\times 80\,000$  – б); микроэлектроннограмма слоя TiNiCo после термомеханической обработки с обкаткой - в)

В результате поверхностно-пластическое деформирование приводит к ликвидации пор в покрытии, увеличению плотности покрытия (10-12%), увеличению прочности сцепления покрытия с основой (35-40%), возрастанию микротвердости, повышению функциональных свойств и деформационно-силовых параметров слоев сплавов с эффектом памяти формы TiNiCo.

Проведенные нами калориметрические испытания, показали, что в слое TiNiCo после отжига и поверхностно-пластического деформирования наблюдается следующая последовательность мартенситных превращений  $B2 \leftrightarrow R \leftrightarrow B19'$  и определены температуры мартенситных превращений  $M_f=188,7\text{K}$ ,  $M_s=244,6\text{K}$ ,  $A_s=263,5\text{K}$ ,  $A_f=331,4\text{K}$  (рис.3а). Из рисунка видно, что мартенситное превращение в сплаве TiNiCo происходит через промежуточную R фазу. Образование R фазы, вероятно, вызвано очень мелким зерном аустенита. Возникновению промежуточной R фазы с ромбоэдрической решёткой способствуют поля напряжений, связанные с дислокационной субструктурой и с особенностями наноразмерной структуры. Рентгенофазовый анализ сплава с ЭПФ TiNiCo подтверждает наличие R мартенсита

при комнатной температуре после отжига и поверхностно-пластического деформирования. На рисунке 3б представлены графики зависимостей величины обратимой деформации  $\varepsilon_0$  от наведенной деформации  $\varepsilon_H$  для слоя с эффектом памяти формы TiNiCo после высокоскоростного газопламенного напыления, термической обработки и поверхностно-пластического деформирования.

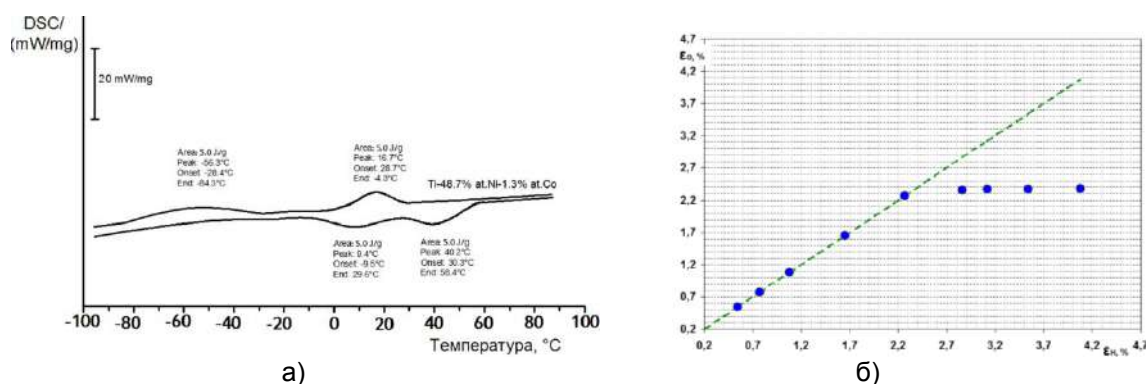


Рисунок 3 – Калориметрические кривые поверхностно-модифицированных слоев TiNiCo, после полного цикла обработки отжиг + поверхностно-пластическое деформирование; графики зависимостей величины обратимой деформации  $\varepsilon_0$  от наведенной деформации  $\varepsilon_H$  (отжиг при температуре 1073K)

После высокоскоростного газопламенного напыления и поверхностно-пластического деформирования наибольшая величина обратимой деформации для слоя TiNiCo равна 2,1-2,3% (рис. 3б), достигается в интервале отжигов 600-800°C.

### Заключение

Проведены исследования структуры и функциональных свойств поверхностных слоев из материалов на основе Ti-Ni-Co полученных высокоскоростным газопламенным напылением механически активированного порошка и последующей поэтапной термомеханической обработки. Установлено, что полученный TiNiCo слой имеет наноразмерную структуру с размером зерна 30-190нм, после термической обработки и поверхностно-пластического деформирования 80-200нм. Обратимая деформация для слоя TiNiCo составила 2,1-2,3%.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда № 15-19-00202 и гранта Президента МК-5445.2016.8.

### Список литературы:

1. Blednova, Zh.M. Influence of Superficial Modification of Steels by Materials with Effect of Memory of the Form on Wear-fatigue Characteristics at Frictional-cyclic[electronic resource] / Zh.M Blednova, P.O. Rusinov, M.A. Stepanenko //Advanced Materials Research. Trans Tech Publications.- Switzerland.- Vols. 915-916.- 2014.- pp. 509-514.
2. Blednova, Zh.M. Mechanical and Tribological Properties of the Composition Steel - nanostructured Surface Layer of a Material with Shape Memory Effect Based TiNiCu [electronic resource] / Zh.M. Blednova, P.O Rusinov // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, Switzerland.-Vols. 592-594.- 2014.-pp 1325-1330.
3. Blednova, Zh.M. The Formation of Nanostructured Surface Layers of a Material with Shape Memory Effect of the TiNi Deposition Melt of the Fusible Metal at a Temperature Gradient[electronic resource] / Zh.M. Blednova, P.O. Rusinov, A.P.Yurkova // Applied Mechanics and Materials.- Vol. 621.-2014.-pp 7-12.
4. Z. Lekston, J. Drugacz. Structure and properties of NiTi and TiNiCo shape memory wires for maxillofacial surgery. Conference Proceedings AMME 2003. pp. 593-596.
5. Yoichi Kishi, Zenjiro Yajima and Ken'ichi Shimizu. Relation between Tensile Deformation Behavior and Microstructure in a Ti-Ni-Co Shape Memory Alloy. Materials Transactions, Vol. 43, No. 5 (2002) pp. 834-839.