

УДК 669.017:620.018:621.78

UDC 669.017:620.018:621.78

**ФОРМИРОВАНИЕ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ TiNiCo,
СТИМУЛИРОВАННОЕ
МЕХАНОАКТИВАЦИЕЙ**

**FORMATION OF SURFACE LAYERS OF
NANOSTRUCTURED TINICO, STIMULATED
WITH MECHANICAL ACTIVATION**

Русинов Петр Олегович
к.т.н., доцент
E-mail: ruspiter5@mail.ru

Rusinov Peter Olegovich
Dr.Sci.Tech., associate professor
E-mail: ruspiter5@mail.ru

Бледнова Жесфина Михайловна
д.т.н., профессор, зав. кафедрой
E-mail: blednova@mail.ru
*Кубанский государственный технологический
университет, г. Краснодар, Россия,
ул. Московская. 2, кафедра ДИПМ*

Blednova Zhesfina Michailovna
Dr.Sci.Tech., professor, Head of the Department
E-mail: blednova@mail.ru
*Kuban state technological university, Krasnodar,
Russia, Street Moscow. 2,*

Рассмотрен комплексный метод формирования поверхностно-модифицированных слоев из материалов с эффектом памяти формы, включающий высокоскоростное газопламенное напыление порошков TiNiCo с содержанием кобальта 2 и 5 %, последующую термическую и термомеханическую обработку, позволивший сформировать наноструктурированные поверхностные слои с повышенным уровнем функционально- механических и эксплуатационных свойств. Показано, что комплексная обработка слоя TiNiCo позволила снизить пористость покрытий и повысить прочность сцепления покрытия с основой. Поверхностное модифицирование TiNiCo по оптимальным режимам позволило повысить циклическую долговечность в условиях многоциклового нагружения на 30-40% и износостойкость в 3-3,5 раза. На основании комплексных металлофизических исследований поверхностных слоев получены новые сведения о наноразмерной композиции

This article presents a complex method of formation of the surface-modified layers of materials with shape memory effect, including high-speed flame spraying powders TiNiCo with a cobalt content of 2 and 5%, subsequent thermal and thermomechanical treatment, allowed forming nanostructured surface layers with a high level of functional and operational properties. It is shown that the TiNiCo complex processing layer allowed reducing the porosity of coatings and increasing the strength of adhesion of the coating to the substrate. Surface modification TiNiCo for optimal regimes allowed increasing fatigue life under high cycle loading by 30-40% and wearing 3-3.5 times. Based on comprehensive research metallophysical surface layers obtained new information on the nanoscale composition

Ключевые слова: ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ, НАНОСТРУКТУРА, ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ГАЗОПЛАМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, МЕХАНИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ, НАНОСТРУКТУРА, МИКРОТВЕРДОСТЬ, ЦИКЛИЧЕСКАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

Keywords: SHAPE MEMORY EFFECT, NANOSTRUCTURE, HIGH-SPEED FLAME SPRAYING, MECHANICAL ACTIVATION, NANOSTRUCTURES, MICROHARDNESS, CYCLIC DURABILITY, WEAR RESISTANCE

Работа выполнена по проекту № 2416 (2014) в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и гранта Президента РФ № МК-5017.2014.8

Введение. Одной из основных задач современного машиностроения, а также науки и техники является разработка конструкционных и

функциональных материалов с улучшенным комплексом технологических и эксплуатационных свойств. Среди различных функциональных материалов особого внимания заслуживают сплавы с термоупругими мартенситными превращениями, обладающие эффектом памяти формы (ЭПФ) и сверхупругости [1]. Самым ярким представителем материалов с ЭПФ является никелид титана - интерметаллид на основе $TiNi$, широко используемый в технике и медицине [2-5].

Известно, что свойства материалов с ЭПФ очень чувствительны к составу сплава, параметрам обработки, предыдущей термической и механической обработки, методам и условиям испытаний [6]. Исследования последних лет показали, что самое эффективное влияние на функционально-механические свойства, на температуру, гистерезис и последовательность мартенситных превращений оказывает, с одной стороны, легирование никелида титана, а с другой - создание нанокристаллической или ультрамелкокристаллической структуры [7,8].

Небольшое изменение в соотношении Ni и Ti или добавление третьего элемента может привести к заметному изменению температуры фазовых превращений и повлиять на механические свойства $NiTi$ - сплавов. Много исследований проведено по влиянию третьего компонента, таких как Fe , Cu , Nb , Zr , Ta и т.д., на температуры фазовых превращений, характеристики памяти формы и сверхупругости [7,9-12]. Среди трехкомпонентных материалов с ЭПФ наименее изученным является сплав $TiNiCo$. В настоящее время сплавы на основе $TiNiCo$, обладающие помимо ЭПФ высокой коррозионной стойкостью, используются, в основном, для изделий медицинского назначения [13-15].

Целью настоящей работы является исследование возможностей формирования наноструктурированных поверхностных слоев из сплавов системы $TiNiCo$ высокоскоростным газопламенным напылением для

повышения эксплуатационных свойств и расширения функциональных возможностей изделий машиностроительного назначения.

Материалы и методы исследований

В качестве материала основы использовалась сталь 45, а материала поверхностного слоя с ЭПФ - порошок TiNiCo (ПН48.5Т50К1.5). Размер частиц порошка составлял 0,5-18 мкм. Нанесение покрытия *TiNiCo* производилось на модернизированной установке высокоскоростного газопламенного напыления ТСЗП-GLC-720 (рис. 1,а) [16]. Установка обеспечивает возможность ввода, как порошка заданного состава, так и отдельный ввод составляющих компонентов с разными температурами плавления в различные зоны газового потока (дозвуковую и сверхзвуковую) с целью обеспечения химического состава покрытия. В качестве горючего газа использовалась смесь метана и кислорода, а в качестве транспортирующего - аргон. Для обеспечения прочности сцепления с основой образцы подвергались дробеструйной обработке с последующим травлением 15% раствором азотной кислоты.

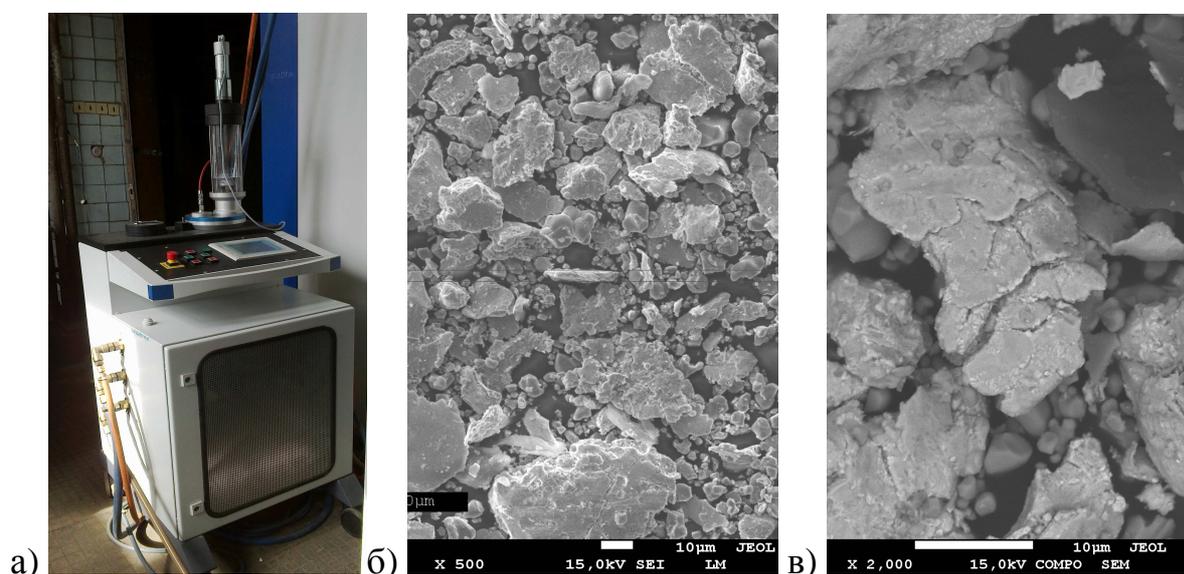


Рис. 1. Установка высокоскоростного газопламенного напыления – (а); морфология частиц порошка марки ПН48.5Т50К1.5 - (б,в)

Перед напылением порошки подвергались измельчению и механической активации в шаровой мельница ГЕФЕСТ-2 (АГО-2У).

Размер частиц порошка $TiNiCo$ для напыления составил 0,5-18 мкм (рис. 1,б,в). Частицы порошка ПН48.5Т50К1.5 имели форму покоробленных чешуек, наиболее ярко выраженную в крупных частицах (рис.1,б,в). Порошок в состоянии утряски имеет мелкие внутричастичные и крупные межчастичные поры. Анализ дифрактограммы порошка ПН48.5Т50К1.5 показал, что его структура состоит из аустенитной фазы (~70%) и мартенситной фазы (~30%). Перед высокоскоростным газопламенным напылением (ВГН) порошок ПН48.5Т50К1.5 подвергался сушке в вакуумном сушильном шкафу в течении 3-6 ч при температуре 120-180°C на противнях из нержавеющей стали при толщине засыпки до 25 мм.

Структуру и фазовый состав поверхностного слоя исследовали методами рентгеноструктурного анализа и световой микроскопии. Рентгенофазовый анализ проводили на приборе *Shimadzu XRD – 7000* в $Cu-K_{\alpha}$ излучении. Исследование микроструктуры проводили на растровом электронном микроскопе *JSM–7500F*. Многоцикловые усталостные испытания при изгибе с вращением проводились на установке МУИ-6000. Испытания на износ производились на машине трения СМТ-1 – 2070, обеспечивающей возможность контроля температуры образца в процессе испытания. Количественная оценка износостойкости производилась гравиметрическим методом.

Технология получения наноструктурированных поверхностных слоев из материала с эффектом памяти формы на основе $TiNiCo$

Проведенные ранее исследования показали, что предварительная механоактивация (МА) порошков приводит к существенному улучшению внутренней структуры покрытия, уменьшению пористости и увеличению адгезии и формированию наноразмерной структуры [6,8]. Это, вероятно, обусловлено тем, что МА порошки обладают запасенной энергией в виде различного рода дефектов, энергия которых выделяется при напылении, что приводит к лучшему проплавлению частиц, формированию

практически монолитной структуры с меньшей пористостью и улучшению механических характеристик покрытий.

В процессе МА частицы порошка $TiNiCo$ подвергаются интенсивной пластической деформации, что приводит к повышению температуры и образованию многочисленных дефектов, которые и являются центрами образования нанозерен. После каждого соприкосновения с рабочим телом частица порошка резко охлаждается (камера охлаждалась водой). При последующих соприкосновениях с рабочим телом происходит дальнейшее формирование нанозерен. Формирование нанозерен происходит до тех пор, пока либо вся частица не приобретет нанокристаллическую структуру, либо нанозерна не достигнут критического размера, при котором дальнейшее пластическое деформирование невозможно. Учитывая, что обрабатываемые сплавы с ЭПФ являются интенсивно упрочняющимися, резкое их охлаждение приводит к повышению хрупкости и дальнейшему измельчению. На рис. 2 представлена зависимость размера частиц $TiNiCo$ от времени МА в высокоскоростной шаровой мельнице (скорость вращения барабана составляла 900 об/мин, отношение массы шаров к массе загрузки порошка 3:1 (экспериментальные данные обработаны в среде SPSS Statistica 6)).

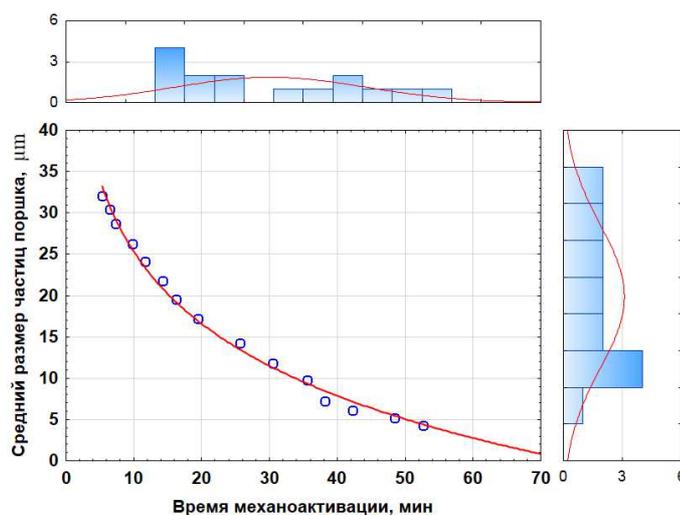


Рис. 2. Влияние времени механоактивации на размер частиц порошка $TiNiCo$ (ПН48.5Т50К1.5), активатор ГЕФЕСТ-2 (АГО-2У)

Результаты исследований и их обсуждение

Первые опыты по ВГН *TiNiCo* непосредственно на стали 45 приводили к неудовлетворительным результатам, связанным с наличием дефектов получаемых покрытий (низкая прочность сцепления покрытия с основой, растрескивание, отшелушивание), что объясняется с существенно отличающимися коэффициентами термического расширения титана (8,3) и стали (16). Для формирования связующего промежуточного слоя между сталью и *TiNiCo* использовался порошок никеля (ПНК1-ВЛ), имеющего неограниченную растворимость с железом и обладающего сродством к большинству частиц второй фазы.

Как показал анализ к основным параметрам ВГН можно отнести: расход горючих газов (метан, кислород), расход порошка и транспортирующего газа (аргон), дистанцию напыления, угол напыления, скорость перемещения и подача газопламенной горелки, скорость вращения покрываемой детали. Проведенные исследования показали, что при формировании поверхностного слоя *TiNiCo* наилучшее качество покрытия достигается при расходе горючих газов метан 70-75 л/мин, кислород 150-160 л/мин. (рис.3), при этом увеличивается прочность сцепления покрытия с подложкой, когезионная прочность, снижается уровень остаточных напряжений и пористость покрытия *TiNiCo*.

Макроанализ поверхностных слоев *TiNiCo*, полученного по отработанной технологии, показал, что структура покрытия достаточно плотная, с минимальным содержанием и размером пор. Граница раздела между покрытием и подложкой без видимых трещин. Металлографические исследования покрытий показали следующие закономерности. После прохождения частиц порошка через газовую струю, они нагреваются и при ударе о подложку затвердевают в виде деформированных дисков, которые имеют диаметр 5-25 мкм и толщину 0,5-1 мкм.

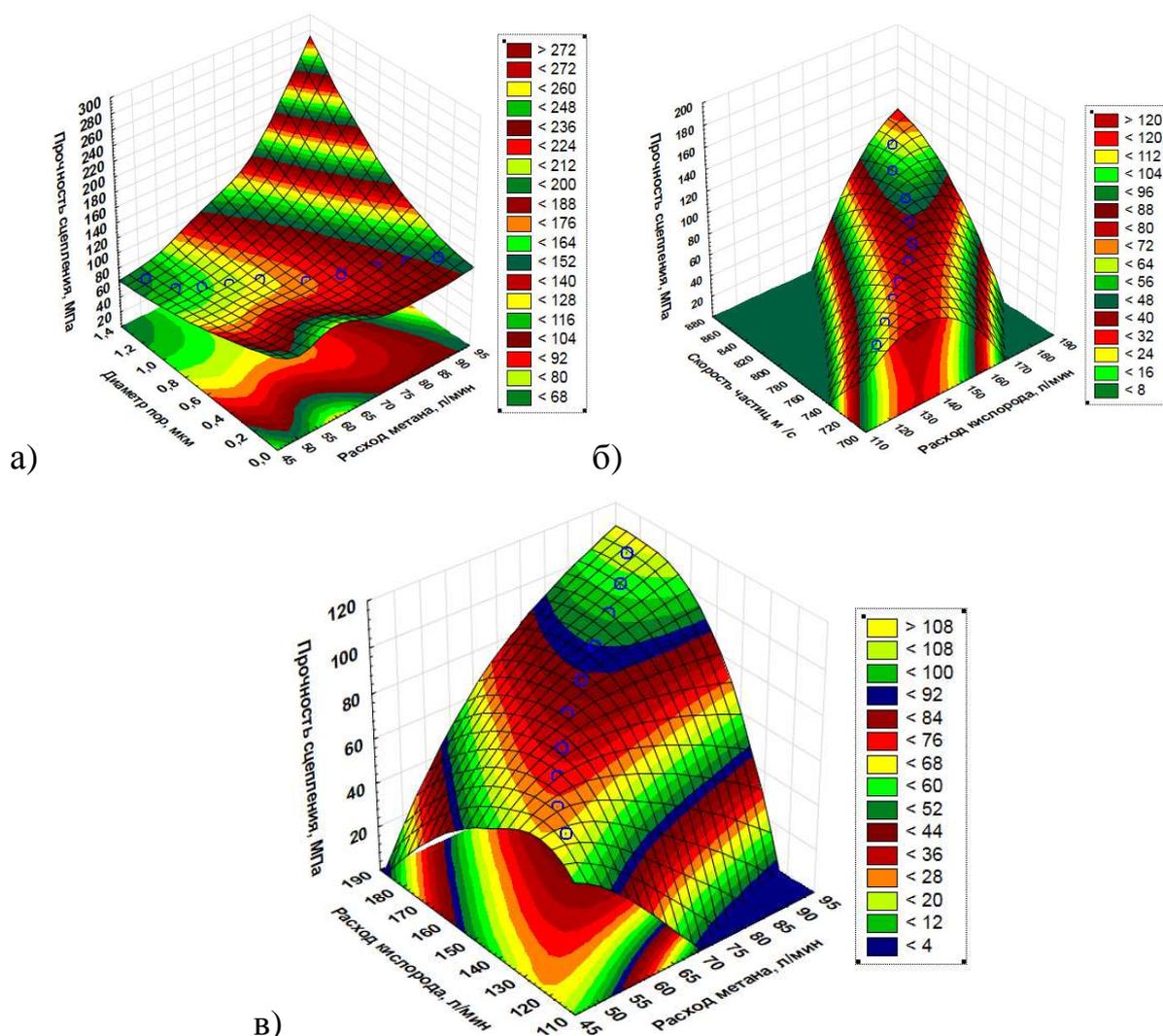


Рис. 3. Влияние состава горючих газов на прочность сцепления покрытия TiNiCo с основой

При комнатной температуре основные структурные составляющие поверхностного слоя *TiNiCo* – аустенитная *B2*-фаза с кубической решеткой, мартенситные фазы *B19'* с моноклинной решеткой, фаза *Ti₂Ni* с кубической решеткой, фаза *Ni₃Ti* с гексагональной решеткой, фаза *Ni₄Ti₃* с ромбоэдрической решеткой, а также наблюдается небольшое количество оксида титана (*TiO*) менее 2% (рис.4). Фазы *Ni₃Ti*, *NiTi₂* преимущественно выделяются в процессе кристаллизации и располагаются по границам зёрен и для их устранения требуется гомогенизирующий отжиг в инертной атмосфере (вакууме) при температуре 800-1000°C в течение 1-2 ч. Известно, что наличие в структуре частиц фаз *Ni₃Ti*, *NiTi₂* размером 15-

40 нм приводит к снижению температурного интервала мартенситных превращений $B2 \rightarrow B19'$.

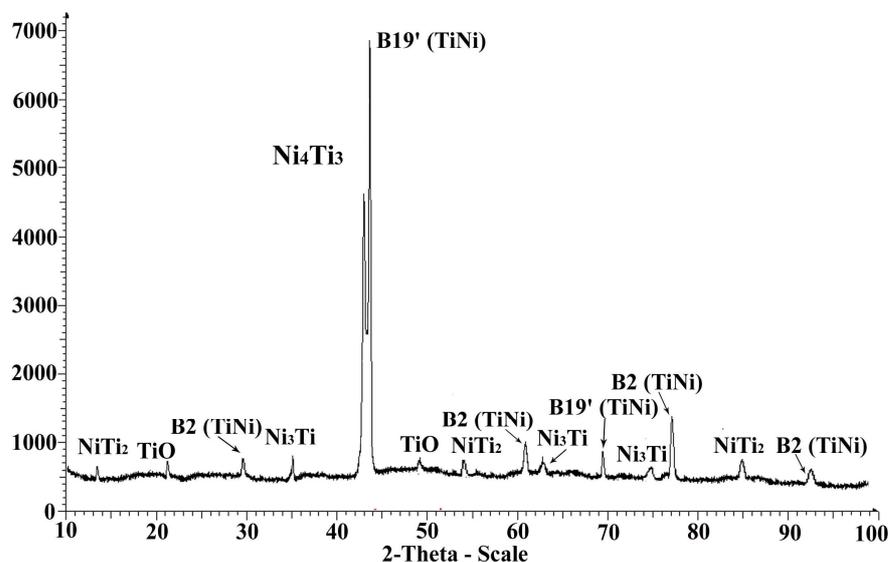


Рис. 4. Рентгенофазовый анализ сплава $TiNiCo$, после ВГН

В работе [17] показано, что при старении обогащенных никелем сплавов на ранних стадиях выделяется метастабильная фаза Ti_3Ni_4 с ромбоэдрической решёткой (параметры, $a = 0,66$ нм, $\alpha = 113,7^\circ$). Частицы Ti_3Ni_4 имеют ориентационную связь с аустенитной структурой $B2$ и создают в направлении $\langle 111 \rangle$, перпендикулярном плоскости частицы, растягивающие напряжения: $[111]B2 \parallel [111]Ti_3Ni_4$, $(321)B2 \parallel (101) Ti_3Ni_4$. Растягивающие напряжения совпадают с ромбоэдрической дисторсией, которая соответствует удлинению пространственной диагонали кристаллической решётки $B2$ фазы при $B2 \rightarrow R$ превращении. После термоциклирования $B2 \rightarrow R$ переход является высоко обратимым. Из работы [18] известно, что если размер частиц Ti_3Ni_4 находится в интервале от 100 нм - 1, 2 мкм, мартенситные превращения осуществляются по схеме $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$. При обеднении матрицы никелем и потере когерентной связи с $B2$ матрицей, поверхность крупных частиц Ti_3Ni_4 является местом зарождения мартенсита $B19'$ [18]. Зарождение частиц Ti_3Ni_4 может происходить при отжиге с приложенными упругими напряжениями.

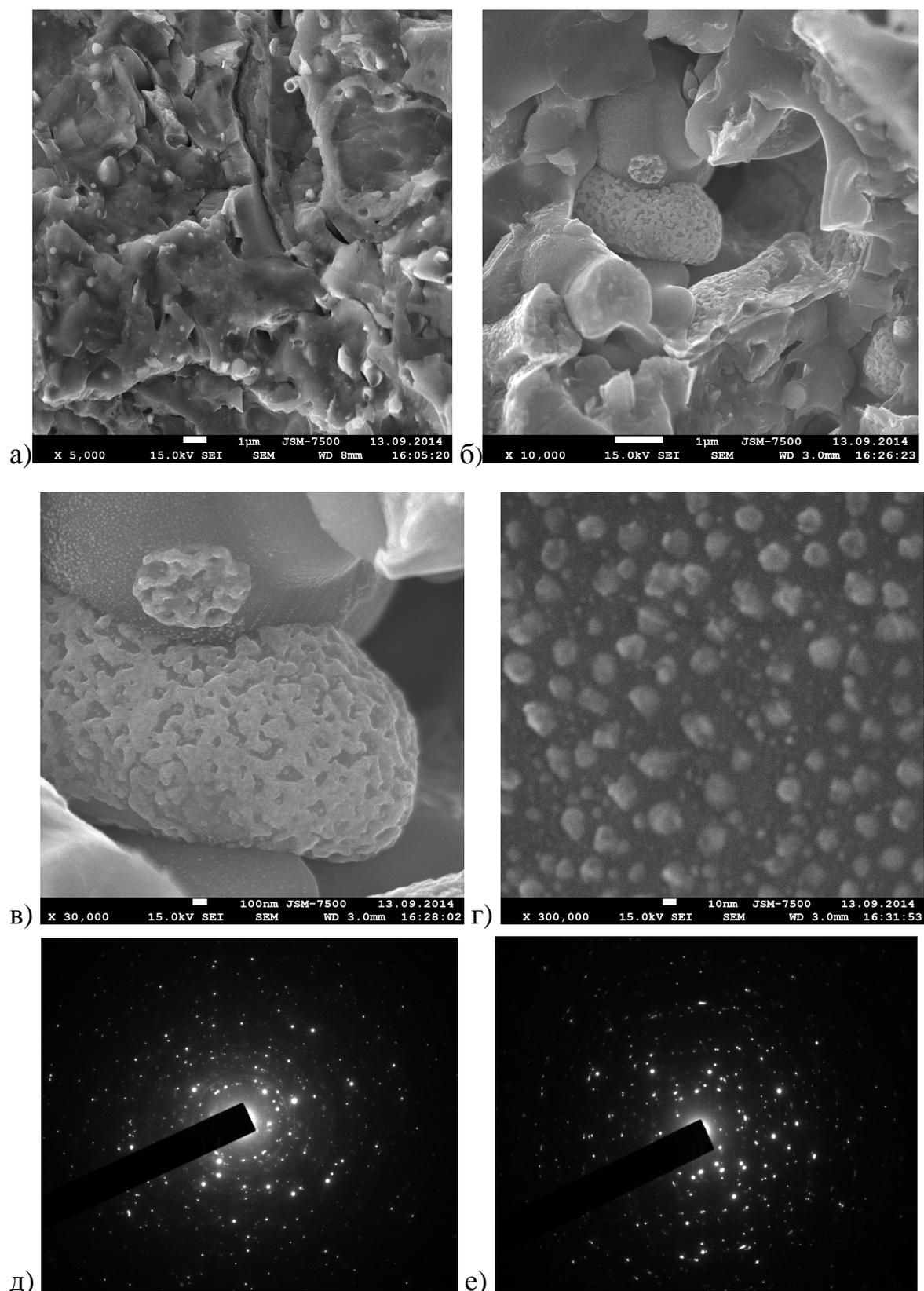


Рис. 5. Наноструктурированное покрытие $TiNiCo$, полученное ВГН – а-г; микроэлектронogramмы аустенитной $B2$ и мартенситной $B19'$ фазы, фаз Ti_2Ni , Ni_3Ti , Ni_4Ti_3 с небольшими включениями оксида титана – д,е)

Как показал металлографический анализ, структура формируемых в результате ВГН поверхностных слоев *TiNiCo* имеет крайне слабую травимость обычными реактивами вследствие сильного измельчения зерна в результате высокой скорости соударения частиц с подложкой и высокой скорости их охлаждения, что обеспечивает особые структурные эффекты. Полученное *TiNiCo* покрытие имеет наноразмерную структуру (размер зерна 30-190 нм) (рис.5). Во многом образование такого покрытия связано с особенностями ВГН (высокая скорость соударения частиц с подложкой, высокая скорость их охлаждения и быстрая закалка сплава). На рис.6 представлено количественное распределение размера зерен и их процентного содержания в покрытии *TiNiCo*, а также размер пор и их процентное содержание.

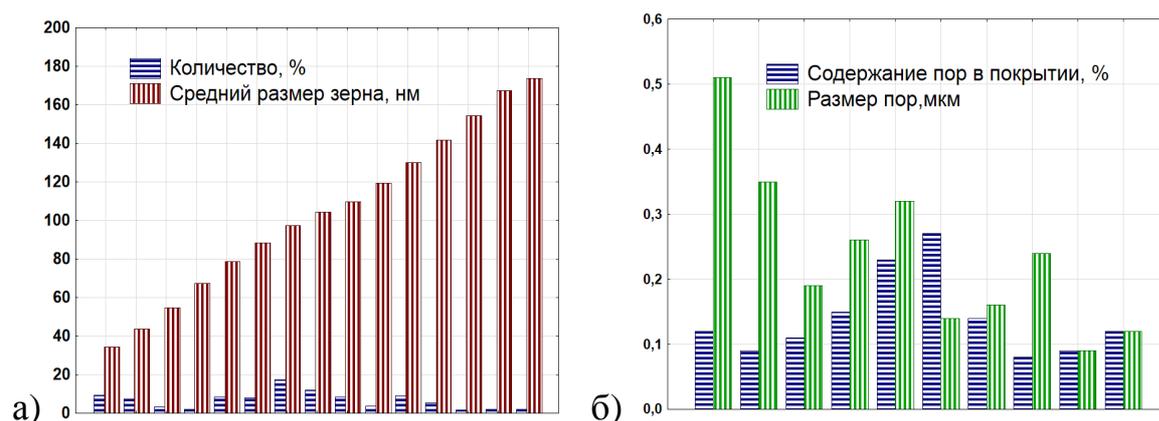


Рис. 6 Количественное распределение размера зерен (а) и пор (б) и их процентное содержание в покрытии *TiNiCo*

Для всех исследованных образцов наблюдалось повышенное значение микротвердости напыленного слоя *TiNiCo* относительно основного металла. Распределение микротвердости по глубине слоя *TiNiCo* после ВГН на стали 45 представлено на рис. 7. Микротвердость *TiNiCo*-слоя колеблется в пределах $H_{\mu}=9,2\div 11,6$ ГПа. Такое повышение микротвердости объясняется тем, что вследствие высоких скоростей соударения частиц с подложкой, высокой скорости их охлаждения и быстрой закалки сплава образуются высокопрочные, метастабильные структуры.

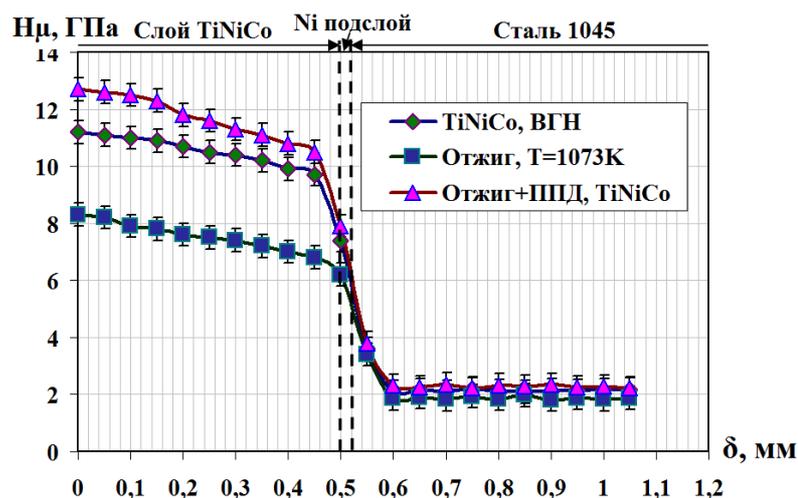


Рис. 7 Распределение микротвердости поверхностного слоя Ni-TiNiCo, полученного ВГН на стали 45, $\delta_{TiNiCo}=0,5$ мм

Термическая и термомеханическая обработка слоев *TiNiCo*

Формирование поверхностных слоев из материалов с ЭПФ представляет собой многостадийный процесс, на каждом этапе этого процесса совершенствуются параметры функционально-механических свойств. Одним из таких этапов являются термические операции. Высокоскоростное газопламенное напыление сплавов с эффектом памяти формы на основе *TiNiCo* приводит к высокой плотности дефектов кристаллической решетки и возникновению остаточных напряжений, причем их величина и характер распределения определяются природой напыляемых материалов и условиями напыления. Внутренние напряжения, препятствуя подвижности границ двойникования, могут приводить к снижению функционально-механических свойств получаемых слоев, а также к растрескиванию либо отслаиванию покрытий от основы. В соответствии с механизмом релаксации остаточных напряжений при отжиге их частичная или полная релаксация является побочным процессом, совершающимся при гомогенизационном либо рекристаллизационном отжиге. При этом, отжиг используется как средство усовершенствования характеристик памяти формы, поскольку при релаксации напряжений мартенситные двойники могут быть подвижными

внутри свободных субграниц. Термическая обработка (ТО) является промежуточной операцией, в результате которой происходит стабилизация структуры покрытия *TiNiCo*, улучшение свойств памяти при уменьшении остаточных напряжений после напыления. Температура отжига для сплава *TiNiCo* составляла 800°C, отжиг проводился в инертной среде (аргона) в течении 1ч с последующим охлаждением с печью. В результате ТО оказывает существенное влияние на структуру покрытия и стали. Рентгенофазовый и металлографический анализ поверхностных слоев *TiNiCo* после отжига показывает наличие аустенитной *B2*-фазы, мартенситной фазы *B19'*, фазы *Ni₄Ti₃*, *TiO* в количестве менее 1%.

После отжига происходит увеличение размера зерна *TiNiCo* в 1,5-2 раза до 250-350нм (рис. 8), снижается микротвердость покрытия, которая чувствительна к структурным изменениям (рис.8). Таким образом, отжиг оказывает существенное влияние на структуру, микротвердость, состав, устранение химической неоднородности поверхностных слоев *TiNiCo* в результате происходит улучшение свойств поверхностных слоев из сплавов с ЭПФ.

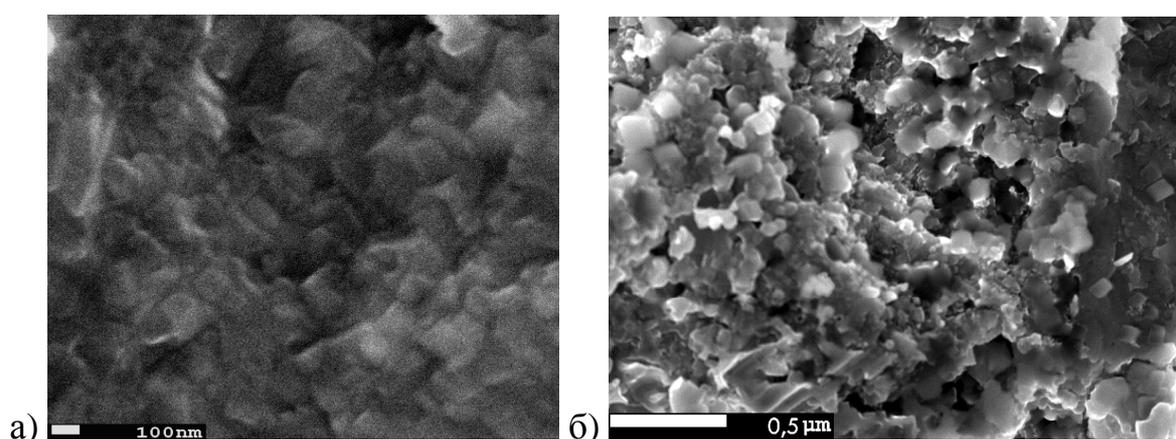


Рис. 8. Микроструктура покрытия *TiNiCo* после термической обработки (отжиг при $T=873^{\circ}\text{C}$). $\times 50000$ – а); $\times 35000$ – б)

Следующим этапом обработки поверхностных слоев из материалов с ЭПФ является термомеханическая обработка (ТМО) поверхностным пластическим деформированием (ППД), которая представляет собой

способ управления функционально-механическими свойствами сплавов с ЭПФ. ППД слоя $TiNiCo$ производится для создания необходимого уровня реактивных напряжений и обратимой деформации, обеспечивающих формовосстановление. Структура покрытия, полученная после ВГН, ТО (отжиг при $800^{\circ}C$) и ППД (обкатка роликами) [6] представлена на рис. 9.

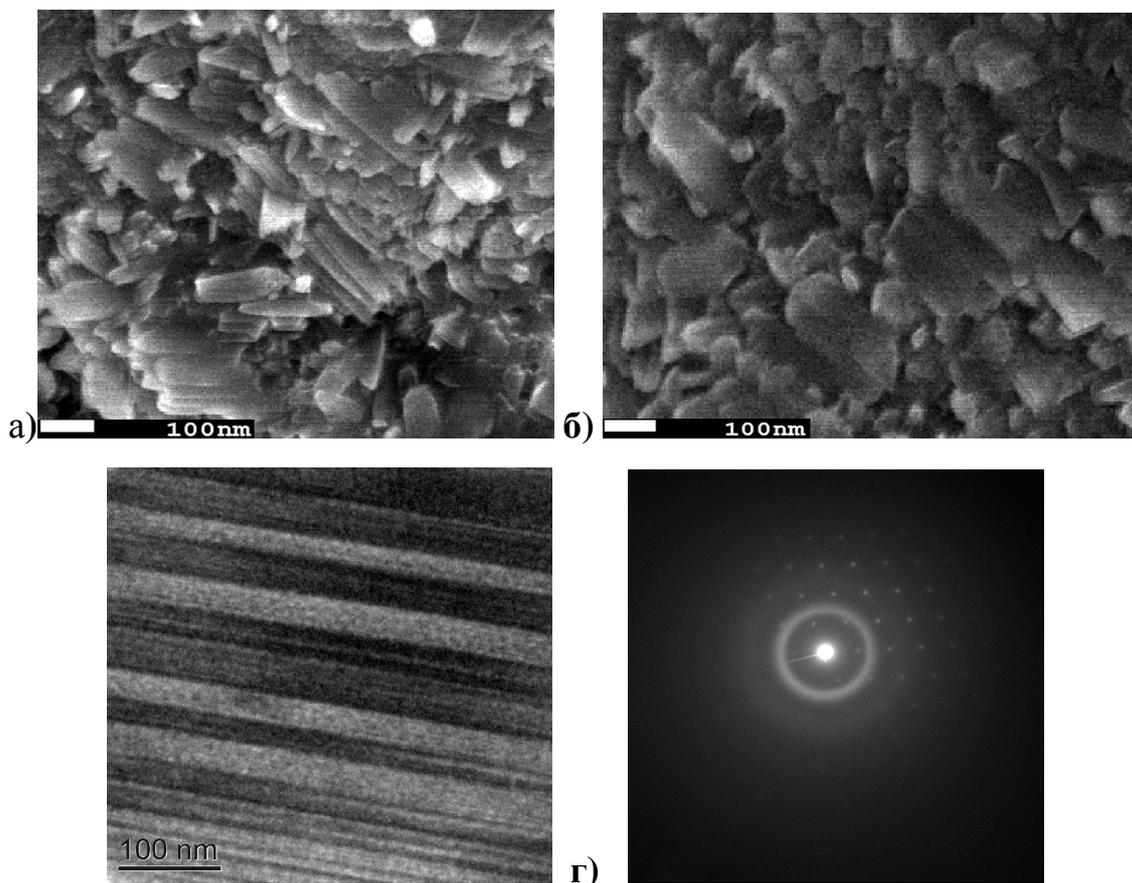


Рис. 9. Микроструктуры слоя $TiNiCo$ после ТМО: а) $\times 45000$; б) $\times 50000$; в) $\times 80000$; микроэлектроннограмма сплава $TiNiCo$ после ТМО - г)

В результате ППД происходит уменьшение размера зерна и равномерное его распределение по глубине слоя. После ППД и термоциклирования формируется наноструктурированный слой $TiNiCo$ с размером зерна 80-200 нм, причем, зерна имеют выраженную направленность (рис.9 а,б). Таким образом, ТМО в сочетании с ППД, являясь заключительным этапом термомеханического цикла получения изделия поверхностно-модифицированного материалами с ЭПФ, приводит к упрочнению слоя, уменьшению шероховатости поверхности, устранению

пор, измельчению зерна и обеспечивает необходимый уровень реактивных напряжений и обратимой деформации.

Для оценки эксплуатационных свойств образцов из стали 45 после поверхностного модифицирования *TiNiCo* выполнены испытания на многоцикловую усталость при изгибе с вращением, которые показали существенное повышение долговечности (рис.10, а). Наибольшее значение амплитуды переменных напряжений, до которого образцы не разрушались базовое число циклов (предел выносливости σ_{-1}) для стали 45 без покрытия составляет 275 МПа, а после поверхностного модифицирования сплавом с ЭПФ *TiNiCo* – 420 МПа, т. е. увеличилось на $\approx 34,5\%$.

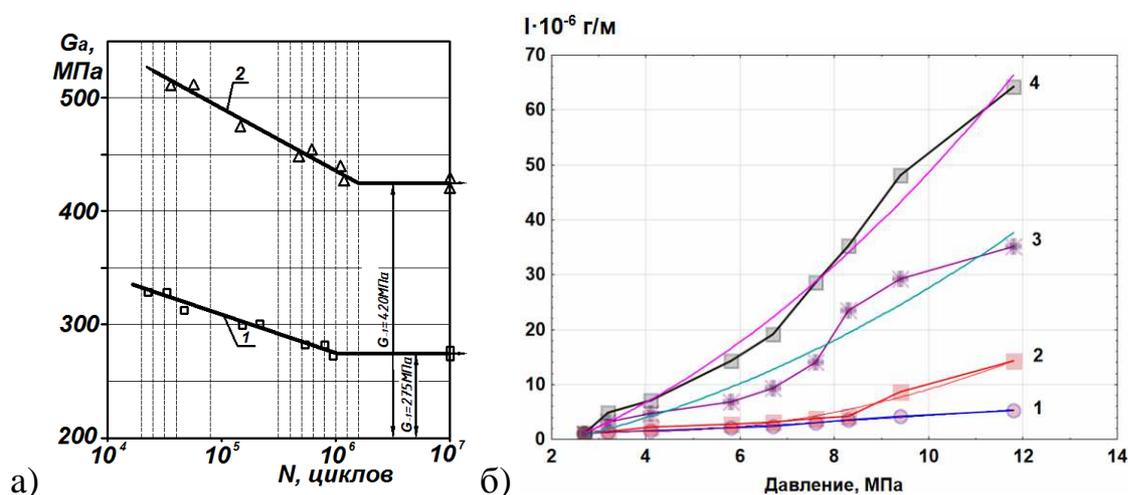


Рис. 10. Кривые выносливости стали 45: без покрытия (1), после поверхностного модифицирования *TiNiCo* (2) – а); зависимость интенсивности изнашивания *I* от давления диска *P*: скорость скольжения диска 0,5м/с -1; 1 м/с -2; 1,5 м/с -3; 2 м/с -4– б)

На рис. 10 приведены результаты испытания на износ образцов из стали 45 с поверхностным наноструктурированным слоем *TiNiCo* толщиной 0,5мм, полученным ВГН, по схеме диск-диск. Испытания проводились в условиях сухого трения при различных скоростях скольжения диска. В процессе нагружения измерялась температура в месте контакта. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью прикладного пакета Statistica v10.0 в среде SPSS. Анализ

полученных зависимостей показывает (рис. 10,б), что при больших скоростях испытания практически отсутствует период приработки, а при малых скоростях он слабо выражен. Повышение износостойкости поверхностно модифицированного слоя *TiNiCo* составляет 3-3,5 раза по сравнению со сталью.

Выводы

Разработана технология формирования наноструктурированных поверхностных слоев из сплавов системы *TiNiCo* с использованием высокоскоростного газопламенного напыления для повышения эксплуатационных свойств и расширения функциональных возможностей изделий машиностроительного назначения.

На основе экспериментальных исследований показано, что механоактивация порошков из материалов с ЭПФ на основе *TiNiCo*, позволяет создать эффективную технологию подготовки напыляемого материала, которая обеспечила формирование наноструктурированных поверхностных слоев при ВГН. За счет нанесения промежуточного подслоя никеля, обладающего неограниченной растворимостью с железом, и предварительных технологических операций обеспечивается прочное сцепление на границе сталь – слой *TiNiCo*.

Установлены управляющие параметры обработки, контролирующие структурное состояние материала на этапе получения поверхностно-модифицированного слоя, а также последующей комбинированной обработки, позволяющей целенаправленно влиять на функционально-механические свойства поверхностного слоя *TiNiCo*. В результате термической обработки, происходит стабилизация структуры покрытия *TiNiCo* улучшение свойств памяти при уменьшении остаточных напряжений после напыления сплава *TiNiCo*. В результате ППД происходит увеличение плотности покрытия (на 10-12%), увеличение прочности сцепления покрытия с основой (на 35-40%), повышение

микротвердости, повышению функционально-механических свойств и деформационно-силовых характеристик поверхностных слоев *TiNiCo*.

Экспериментально установлено, что после высокоскоростного газопламенного напыления механически активированного порошка с эффектом памяти формы *TiNiCo* улучшаются эксплуатационные свойства: циклическая долговечность в условиях многоциклового усталости увеличивается на ~34,5%; износостойкость увеличилась в 3-3,5 раза.

Список используемой литературы

1. Материалы с эффектом памяти формы / Справочник: Под ред. Лихачева В.А. – Т. 1. – СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1997. – 424 с.
2. Razov A. I. Application of Titanium Nickelide-Based Alloys in Engineering. The Physics of Metals and Metallography Vol. 97, Suppl. 1. 2004. pp. 97-126.
3. Бледнова Ж.М., Проценко Н.А. Материалы с эффектом памяти формы и устройства на их основе в обеспечении безотказности аккумуляторных батарей космического назначения. Краснодар: «Издательский дом-Юг», 2013.–161 с.
4. Гюнтер В.Э., Домбаев Г.Ц., Сысолятин П.Г. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Томск: ТГУ, 1998. – 486 с.
5. Blednova Z.M., Rusinov P.O., Stepanenko M.A. Superficial Modifying by SME materials In Engineering Appendices. Materials Science Forum. V 738-739 (2013). 595-600.
6. Бледнова Ж.М., Махутов Н.А., Чаевский М.И. Поверхностное модифицирование материалами с эффектом памяти формы. Краснодар: «Издательский Дом-Юг», 2009. – 354 с.
7. Клопотов В.Д. и др. Физико-химические подходы к выбору легирующих элементов в тройных сплавах с эффектами памяти формы на основе никелида титана. Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 2. С. 114-120.
8. Blednova Zh.M., Rusinov P.O. Formation of nanostructured surface layers by plasma spraying the mechanoactivated powders of alloys with Shape Memory Effect. Nanotechnologies in Russia V. 5, №3-4, (2010).
9. Rusinov P.O., Blednova Zh.M., Formation of nanostructured surface layers from Materials with shape Memory effect TiNiCu in conditions. Materials Science Forum. V. 738-739 (2013). pp 512-517.
10. Blednova Zh.M., Rusinov P.O. Mechanical and Tribological Properties of the Composition “Steel-nanostructured Surface Layer of a Material with Shape Memory Effect Based TiNiCu”. Applied Mechanics and Materials V. 592-594 (2014). pp. 1325-1330.
11. Lekston Z., Goryczka T., Jędrusik-Pawłowska M. Effect of annealing on the transformation and properties of TiNiCo and TiNiTa shape memory alloys for medical applications. Advances in Materials Science. 2007. V. 7. № 3(13). pp.50-56.
12. Chen O., Andrawes B., Sehitoglu H. Thermomechanical testing of FeNiCoTi shape memory alloy for active confinement of concrete /Smart Materials and Structures, 2014, V.23(5).
13. Pushin V.G. Rapidly quenched TiNiCo alloys with shape memory effect: 1. Martensitic transformations and mechanical properties / Popov V.V., Kuntsevich T.Eh., Kourov N.I., Korolev A.V. Fizika Metallov i Metallovedenie. 2001. V. 91 (4). pp. 54-62

14. Lekston Z., Drugacz J. Structure and properties of NiTi and TiNiCo shape memory wires for maxillofacial surgery. 12th International scientific conference Achievements in mechanical and materials engineering. 2007. pp. 593-596.

15. Bagoury N. Microstructure and martensitic transformation and mechanical properties of cast Ni rich NiTiCo shape memory alloys. Materials Science and Technology. 2014. V. 30, Issue 14, pp. 1795-1800.

16. Русинов П.О., Бледнова Ж.М., Балаев Э.Ю. Методические подходы и технические решения по формированию наноструктурированных поверхностных слоев Ti-Ni высокоскоростным газопламенным напылением // Известия Самарского научного центра РАН. Т.15. № 4(2), 2013. С.484-488.

17. Хачин В.Н. Никелид титана. Структура и свойства / В.Н. Хачин, В.Г. Пушин, В.В. Кондратьев. М.: Наука, 1992. 160 с.

18. Зельдович В.И., Хомская И.В., Фролова Н.Ю. и др. О зарождении R мартенсита в никелиде титана. // ФММ. 2001. Т.92. №5. С 84-90.

References

1. Materialy s jeffektom pamjati formy / Spravochnik: Pod red. Lihacheva V.A. – Т. 1. – SPb.: Izd-vo NIИ SPbGU, 1997. – 424 s .

2. Razov A. I. Application of Titanium Nickelide–Based Alloys in Engineering. The Physics of Metals and Metallography Vol. 97, Suppl. 1. 2004. rr. 97-126.

3. Blednova Zh.M., Procenko N.A. Materialy s jeffektom pamjati formy i ustrojstva na ih osnove v obespechenii bezotkaznosti akkumuljatornyh batarej kosmicheskogo naznachenija. Krasnodar: «Izdatel'skij dom-Jug», 2013.–161 s.

4. Gjunter V.Je., Dombaev G.C., Sysoljatin P.G. i dr. Medicinskie materialy i implantaty s pamjat'ju formy. Tomsk: TGU, 1998. – 486 s.

5. Blednova Z.M., Rusinov P.O., Stepanenko M.A. Superficial Modifying by SME materials In Engineering Appendices. Materials Science Forum. V 738-739 (2013). 595-600.

6. Blednova Zh.M., Mahutov N.A., Chaevskij M.I. Poverhnostnoe modificirovanie materialami s jeffektom pamjati formy. Krasnodar: «Izdatel'skij Dom-Jug», 2009. – 354 s.

7. Klopotov V.D i dr. Fiziko-himicheskie podhody k vyboru legirujushih jelementov v trojnyh splavah s jeffektami pamjati formy na osnove nikelida titana. Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2011. T. 319. № 2. S. 114-120.

8. Blednova Zh.M., Rusinov P.O. Formation of nanostructured surface layers by plasma spraying the mechanoactivated powders of alloys with Shape Memory Effect. Nanotechnologies in Russia V. 5, №3-4, (2010).

9. Rusinov P.O., Blednova Zh.M., Formation of nanostructured surface layers from Materials with shape Memory effect TiNiCu in conditions. Materials Science Forum. V. 738-739 (2013). pp 512-517.

10. Blednova Zh.M., Rusinov P.O. Mechanical and Tribological Properties of the Composition “Steel-nanostructured Surface Layer of a Material with Shape Memory Effect Based TiNiCu”. Applied Mechanics and Materials V. 592-594 (2014). pp. 1325-1330.

11. Lekston Z., Goryczka T., Jędrusik-Pawłowska M. Effect of annealing on the transformation and properties of TiNiCo and TiNiTa shape memory alloys for medical applications. Advances in Materials Science. 2007. V. 7. № 3(13). pp.50-56.

12. Chen O., Andrawes B., Sehitoglu H. Thermomechanical testing of FeNiCoTi shape memory alloy for active confinement of concrete /Smart Materials and Structures, 2014, V.23(5).

13. Pushin V.G. Rapidly quenched TiNiCo alloys with shape memory effect: 1. Martensitic transformations and mechanical properties / Popov V.V., Kuntsevich T.Eh., Kourov N.I., Korolev A.V. Fizika Metallov i Metallovedenie. 2001. V. 91 (4). pp. 54-62

14. Lekston Z., Drugacz J. Structure and properties of NiTi and TiNiCo shape memory wires for maxillofacial surgery. 12th International scientific conference Achievements in mechanical and materials engineering. 2007. pp. 593-596.

15. Bagoury N. Microstructure and martensitic transformation and mechanical properties of cast Ni rich NiTiCo shape memory alloys. Materials Science and Technology. 2014. V. 30, Issue 14, pp. 1795-1800.

16. Rusinov P.O., Blednova Zh.M., Balaev Je.Ju. Metodicheskie podhody i tehniczeskie reshenija po formirovaniyu nanostrukturirovannyh poverhnostnyh sloev Ti-Ni vysokoskorostnym gazoplammennym napyleniem // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN. T.15. № 4(2), 2013. S.484-488.

17. Hachin V.N. Nikelid titana. Struktura i svojstva / V.N. Hachin, V.G. Pushin, V.V. Kondrat'ev. M.: Nauka, 1992. 160 s.

18. Zel'dovich V.I., Homskaja I.V., Frolova N.Ju. i dr. O zarozhdenii R martensita v nikelide titana. // FMM. 2001. T.92. №5. S 84-90.