

УДК 669.017:620.018:621.78

UDC 669.017:620.018:621.78

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИИ «СТАЛЬ –
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЙ СЛОЙ
TiNiCu» ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ
ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ**

**TECHNOLOGICAL RULES OF FORMATION
OF STEEL – NANO-STRUCTURED LAYER
Ti-Ni-Cu COMPOSITION WITH A HIGH SPEED
FLAME SPRAYING**

Бледнова Жесфина Михайловна
д.т.н., профессор
E-mail: blednova@mail.ru

Blednova Zhesfina Mikhailovna
Dr.Sci.Tech., professor
E-mail: blednova@mail.ru

Русинов Петр Олегович
к.т.н.
E-mail: ruspiter_@rambler.ru

Rusinov Peter Olegovich
Cand.Tech.Sci.
E-mail: ruspiter_@rambler.ru

Бледнов Юрий Гаврилович
к.т.н., доцент

Blednov Yury Gavrilovich
Cand.Tech.Sci., associate professor

Плаксин Василий Александрович
к.т.н., доцент

Plaksin Vasiliy Aleksandrovich
Cand.Tech.Sci., associate professor

Балаев Эйтибар Юсиф Оглы
Аспирант, кафедра ДиПМ
*Кубанский государственный технологический
университет, г. Краснодар, Россия,
ул. Московская. 2*

Balayev Etibar Yusif
postgraduate student
*Kuban state technological university, Krasnodar,
Russia*

Разработан комбинированный метод формирования композиции «сталь – поверхностный из материалов с эффектом памяти формы на основе *TiNiCu*», включающий механическую активацию порошка, высокоскоростное газопламенное напыление, последующую термомеханическую обработку. Определены управляющие параметры и рекомендованы оптимальные режимы обработки, обеспечивающие формирование поверхностных слоев с наноразмерной структурой, химический и фазовый состав которых соответствует ЭПФ

The combined method of formation of the “Steel - superficial of materials with effect of memory of the form on the basis of *TiNiCu*” composition, which includes mechanical activation of powder, the high-speed gas-flame dusting, the subsequent thermo-mechanical processing is considered. The operating parameters are defined and the optimum modes of processing providing formation of the layers with nano-sized structure are recommended, chemical and phase composition of which corresponds to the shape memory effect

Ключевые слова: ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ, НАНОСТРУКТУРА, ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ГАЗОПЛАМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, МЕХАНИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ, ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ

Keywords: SHAPE MEMORY EFFECT, NANOSTRUCTURE, HIGH-SPEED FLAME SPRAYING, MECHANICAL ACTIVATION, THERMO-MECHANICAL PROCESSING, SURFACE PLASTIC DEFORMATION

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

Введение

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. Сплавы с ЭПФ на основе $TiNi$ используются при изготовлении ряда новых устройств и изделий медицинской, авиационной и космической техники, спецмашиностроения (силоприводы для аварийного выпуска шасси самолета, микророботы, манипуляторы, силовые устройства типа съемников при монтаже турбин, атомных реакторов и других уникальных сооружений) [1]. Эффективным способом влияния на характеристические температуры и последовательность мартенситных превращений, а также на весь комплекс функционально-механических свойств является легирование никелида титана [2].

В условиях необходимости обеспечения ресурсосбережения актуальным становится направление, связанное с методами поверхностного модифицирования (ПМ) сталей материалами с ЭПФ и создания композиционных материалов. Формирование поверхностных слоев из материалов с ЭПФ в настоящее время осуществляется различными способами высокоэнергетических воздействий (аргонно-дуговая и лазерная наплавка, сварка взрывом, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, осаждение из расплава легкоплавких металлов, различные вакуумно-плазменные методы) [3].

Известно, что традиционные методы обработки материалов с ЭПФ приводят к формированию в сплавах развитой дислокационной субструктуры. Дополнительные же возможности повышения комплекса функциональных свойств $TiNi$ заключаются в применении к ним нетрадиционных схем комбинированной обработки, включающей в

различных комбинациях термическую, термомеханическую обработку и интенсивное пластическое деформирование, приводящих к формированию нанокристаллической или аморфной структуры. В этом направлении в последнее время получены многообещающие результаты [4-5]. В машиностроении создание наноструктурированных поверхностных слоев с повышенными эксплуатационными и функциональными свойствами позволит оптимизировать конструкции, повысить их надежность и приведет к энерго- и ресурсосбережению, улучшению прочностных и противоизносных свойств изделий. Одним из перспективных методов ПМ материалами с ЭПФ изделий машиностроительного назначения является высокоскоростное газопламенное напыление (ВГН) [6].

Среди материалов с ЭПФ наиболее перспективным на сегодняшний день является хорошо зарекомендовавший себя эквиатомный сплав $TiNi$, для которого характерно благоприятное сочетание свойств – высокий уровень механических, коррозионных и термомеханических характеристик и высокая термостабильность. В то же время эти сплавы достаточно дороги, сложны в изготовлении и со значительными трудностями поддаются механической обработке. Наиболее широкими возможностями обладают многокомпонентные сплавы с ЭПФ [2]. Так, легирование $TiNi$ медью [7] представляет интерес как с точки зрения расширения круга сплавов с ЭПФ с повышенными функционально-механическими свойствами, так и с точки зрения изучения влияния меди на характеристические температуры и температурный гистерезис мартенситного превращения композиции.

Целью настоящей работы является исследование закономерностей формированию композиции «сталь – наноструктурированный поверхностный слой $TiNiCu$ » высокоскоростным газопламенным напылением механически активированных порошков.

Материалы и методы исследования

Формирование композиции «сталь – поверхностный слой с ЭПФ на основе *TiNiCu*» осуществлялось в несколько этапов: подготовка поверхности (дробеструйная обработка с последующем травлением в 15% растворе азотной кислоты, промывка и сушка порошка); механоактивация (МА) порошка; нанесение тонкого слоя чистого никеля, обладающего неограниченной растворимостью с железом, для обеспечения лучшей адгезии; ВГН слоя *TiNiCu* необходимой толщины, последующая термическая и термомеханическая обработка (ТМО) для обеспечения заданных функциональных свойств.

В качестве основы использовалась сталь 45, в качестве материала для формирования поверхностных слоев *TiNiCu* следующего химического состава: 43,89%Ni, 50,87%Ti, 4,97%Cu, 0.012%Fe, 0,06%C, 0.08%Ca. Исходный размер фракций порошка составлял 15÷30 мкм. Для формирования подслоя никеля использовался порошок ПНК1-ВЛ-7 (производство ОАО «Тулачермет»).

Исследования показали, что исходный размер частиц оказывает существенное влияние на структуру и свойства формируемого слоя. В целях повышения адгезионных свойств наносимых поверхностных слоев порошки Ni, *TiNiCu* подвергали МА в высокоскоростной планетарной шаровой мельнице ГЕФЕСТ– 2 (АГО-2У). Параметры МА следующие: частота вращения барабана 800 - 2220 мин⁻¹, частота вращения водила 600-1090 мин⁻¹, диаметр стальных шаров 6 мм, время работы 2-8 мин.

Поверхностное модифицирование сталей материалами с ЭПФ многокомпонентного состава осуществлялась на модернизированной вакуумной установке ТСЗП-GLC-720 [8] (рис.1), позволяющей производить в едином технологическом цикле ВГН порошка и последующую поэтапную термомеханическую обработку. В качестве

горючего газа использовалась смесь метана и кислорода, а в качестве транспортирующего газа для порошка использовался аргон.

Для формирования функциональных свойств поверхностных слоев из материала с ЭПФ производилась ТМО образцов поверхностным пластическим деформированием, обкаткой роликами. Обкатку роликами производили при следующих параметрах: контактная нагрузка на каждый ролик $P=3,5\div 3,8$ кН, диаметр ролика $d_l = 50$ мм, ширина ролика $b_l = 8$ мм, скорость обкатки $v = 94 \cdot 10^{-3}$ м/с, продольная подача – $S = 0,08$ мм/об. Контроль термомеханического возврата образцов, подвергнутых комбинированной обработке, производился после нагрева до температур обратного мартенситного превращения.

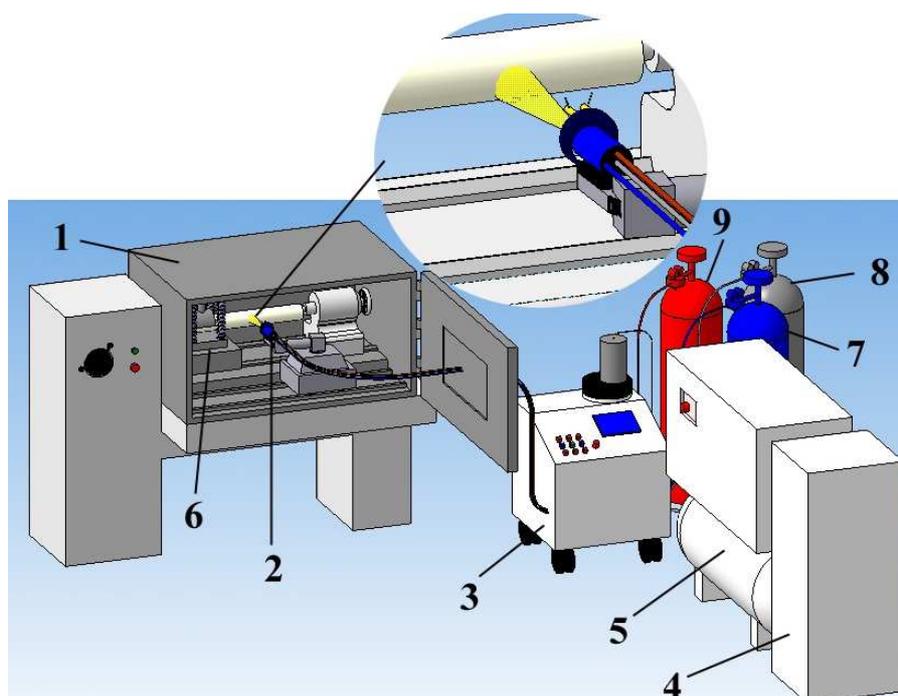


Рис. 1. Вакуумная установка для получения наноструктурированных поверхностных слоев из материала с ЭПФ: 1- вакуумная камера; 2 - газопламенная горелка; 3 - блок управления; 4 - источник питания; 5 - компрессор; 6 - устройство для поверхностно-пластического деформирования; 7 - кислород; 8 - аргон; 9 - метан

В работе использован следующий основной комплекс экспериментальных методов исследования: рентгеноструктурный анализ, спектроскопия, электронная микроскопия. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре Shimadzu XRD - 7000 в $Cu-K\alpha$ излучении ($\lambda=1,54051$). Микроструктура и химический анализ материала сталь-сплав $TiNiCu$ анализировались на электронном микроскопе $JSM-7500F$.

Технологические особенности поверхностного модифицирования

В настоящее время многокомпонентные покрытия из материалов с ЭПФ формируются, в основном, путем напыления заранее приготовленных порошков, нужного для проявления ЭПФ химического состава. Такая технология поверхностного модифицирования является простой, но не лишенной недостатков. Для получения качественных поверхностных слоев из сплавов с ЭПФ методом ВГН частицы порошка должны достигать критических значений температур и скоростей, обеспечивающих надежную адгезию. Снижение температуры частиц порошка не обеспечивает адгезии покрытия и основы, а значительное превышение температуры частиц может привести к выгоранию легирующих элементов с более низкой температурой плавления в процессе напыления и снижению массовой доли легирующего компонента, а, следовательно, к снижению эффективности полученных слоев с ЭПФ. Для управления процессом формирования поверхностных слоев многокомпонентного состава с различной температурой плавления составляющих компонентов необходимо обеспечить возможность ввода компонентов в разные зоны газового потока.

Предложена конструкция сопла для высокоскоростного газопламенного напыления порошков из многокомпонентных материалов с ЭПФ с отдельным вводом напыляемых компонентов. Конструкция сопла предусматривает восемь вводов порошка, четыре ввода в дозвуковой

области и четыре в сверхзвуковой. Вводы расположены под углом 60° к горизонтали (рис. 2). Такое расположение вводов позволяет увеличить скорость движения частиц порошка и улучшает их прогрев.

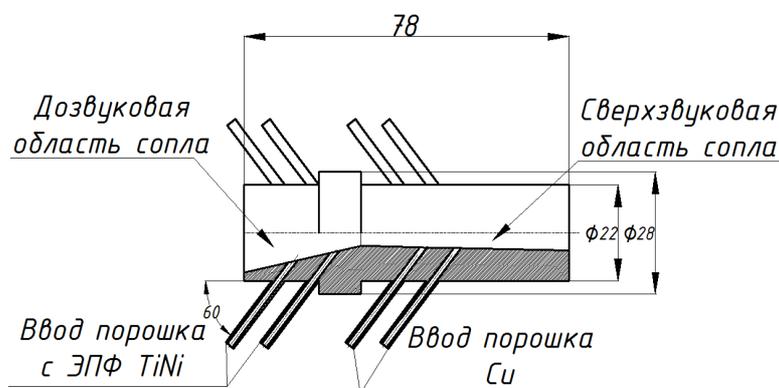


Рис. 2. Схема модернизированного сопла для формирования поверхностных слоев с разделённым вводом компонентов

Сопло выполнено из двух частей: сужающейся (дозвуковая область) и расширяющейся (сверхзвуковая область). Рабочие газы подаются в цилиндрическую камеру смешения через область между стенками усеченного конуса и стенками цилиндра. Рабочий поток включает смеси газов и порошка с ЭПФ. Напыляемые порошки подаются из дозаторов в камеру смешивания через вводы (каналы). Модернизированная установка GLC-720 позволяет изменять рабочее давление газа от 0,8 до 2,3 МПа и температуру газа от 310 К до 900 К. Подача порошка осуществлялась четырьмя независимыми порошковыми дозаторами. Два дозатора служат для подачи порошка в дозвуковую область сопла, два в сверхзвуковую область. При формировании поверхностного слоя трехкомпонентного состава $TiNiCu$ подача порошка $TiNi$ производилась в дозвуковую область сопла, а меди в сверхзвуковую, так как температура плавления меди значительно ниже температуры плавления $TiNi$.

Результаты исследований и их обсуждение

Структуру и свойства покрытий определяют контактные процессы при ударе, деформации, затвердевании, охлаждении частиц порошка и их

взаимодействия в процессе движения в газовом потоке. Поскольку формирование покрытия производится последовательной укладкой множества деформирующихся частиц, то совершенно неизбежно образования пор на границах соединений. Очевидно, что структура покрытий зависит от гранулометрического состава напыляемого материала и чем мельче напыляемый порошок, тем меньше вероятность образования пор. Обычно для напыления рекомендуются порошки 40-70 мкм, все чаще последние годы применяют порошки размером 10-20 нм. Опыт показывает, что использование для напыления порошков малых размеров вызывает некоторые технологические трудности, заключающиеся в выгорании отдельных компонентов напыляемого материала в газовом потоке. Поэтому оптимизация гранулометрического состава является одним из важных этапов разработки технологии формирования композиции «сталь – слой с ЭПФ». Исследования, выполненные с использованием статистических методов, показали, что для получения качественных композиций «сталь – слой TiNiCu» ВГН оптимальный гранулометрический состав МА порошка составляет 0,9-7,5 мкм (рис.3). При использовании порошка более мелких фракцией (менее 0,9 мкм) происходит слипание частиц между собой, комкование и, как следствие, нарушение технологического процесса (залипание канала порошкового дозатора).

В результате меаноактивации в локальных микрообъемах порошка возникают внутренние напряжения, релаксация которых зависит от свойств материала и условий нагружения. Согласно существующим теориям в механохимии инициирование механохимических превращений обеспечивается теплом, выделяющемся при обработке порошков, энергией дислокаций при пластической деформации, высвобождением упругой энергии, аккумулированной в твердом теле, наличием многочисленных межфазных границ [9].

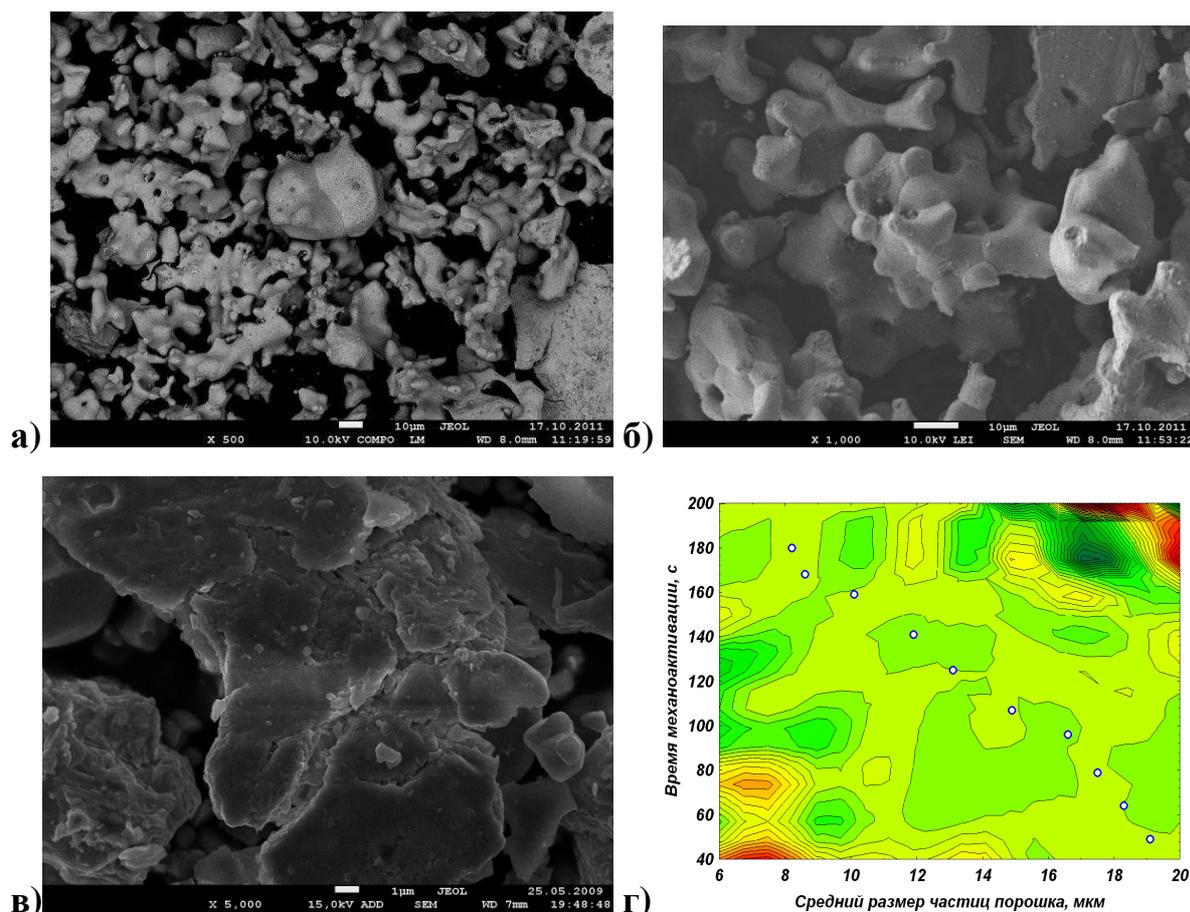


Рис. 3. Порошок $Ti_{50}Ni_{45}Cu_5$ измельченный и механически активированный (ГЕФЕСТ-2) в течение 3 мин - а) $\times 500$; б) $\times 1000$; в) $\times 5000$; влияние времени МА на размер частиц порошка $TiNiCu$ - г)

В процессе механоактивации порошков с ЭПФ происходит деформация кристаллической решетки металла, вследствие чего возникает пространственная и энергетическая неоднородность поверхности, что приводит к увеличению дефектности и энергонасыщенности за счет их пластического деформирования и дробления. При взаимодействии газопламенной струи с МА порошком $TiNiCu$ происходит выделение накопленной энергии, приводящей к изменению свойств. В результате повышается адгезия, когезия поверхностно-модифицированного слоя и снижается его пористость. На рис 3,г представлена зависимость среднего размера частиц порошка от времени механоактивации, полученная в

результате статистической обработки экспериментальных данных в среде SPSS Statistica 6.

На рис. 4 приведена рентгенограмма поверхностного слоя *TiNiCu* на стали 45 при раздельном вводе компонентов в дозвуковую и сверхзвуковую область сопла горелки. Как видно из рисунка, распределение химических элементов равномерное по толщине слоя с ЭПФ. Анализ дифрактограмм порошка *Ti51Ni44Cu5* показал, что структура его состоит преимущественно из аустенитной фазы (~95%), B2 фазы Cu, небольшого количества TiO_2 .

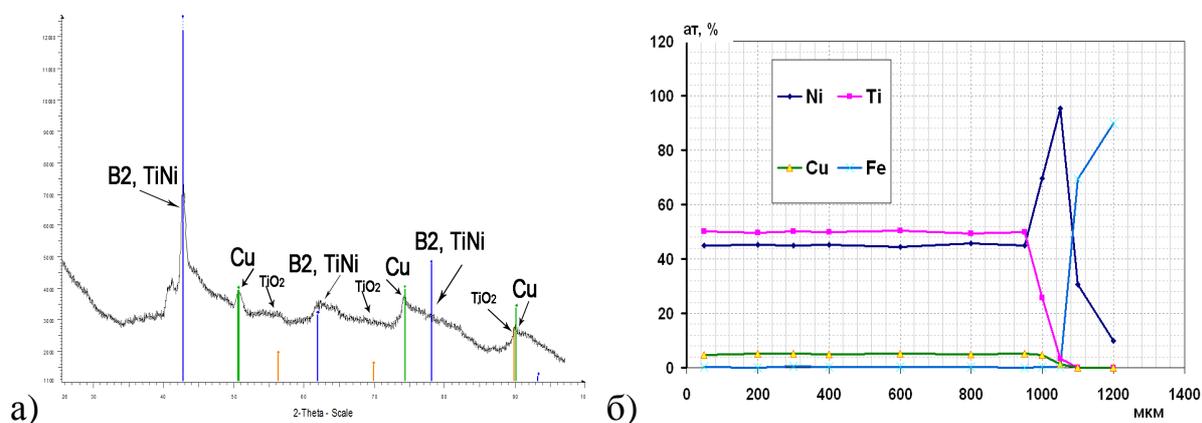


Рис. 4. Рентгенограмма поверхностного слоя *TiNiCu*, сформированного высокоскоростным газопламенным напылением – а); распределение основных химических элементов в композиции «сталь – слой *TiNiCu*» – б)

Статистическое моделирование технологического процесса ВГН

Основными функциональными параметрами, определяющими свойства поверхностных слоев, полученных ВГН, являются адгезия, пористость, структура и фазовый состав. Проведенные исследования показали, что при формировании поверхностного слоя с ЭПФ на основе *TiNiCu* наилучшее качество покрытия достигается при расходе горючих газов: метана 70-75 л/мин, кислорода 150-160 л/мин.

Для определения пористости покрытий с ЭПФ использовался метод гидростатического взвешивания с пропиткой напыленного материала жидкостью [10]. На рис. 5 представлена гистограмма размера пор и их содержания в поверхностном слое *TiNiCu*.

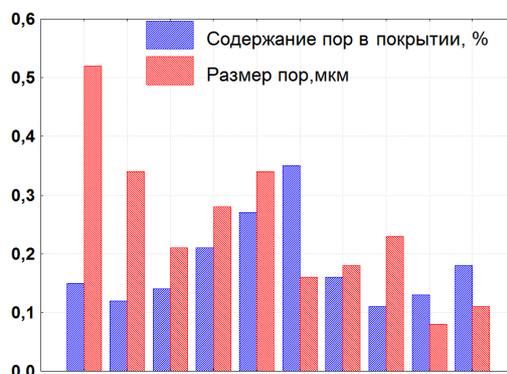


Рис. 5. Распределение пор в поверхностном слое *TiNiCu* и их процентное содержание

Проведенный анализ структуры композиции «сталь – слой с ЭПФ», сформированной ВГН механоактивированного порошка *TiNiCu* и без МА, показал, что МА приводит к существенному улучшению структуры поверхностных слоев, уменьшению пористости и увеличению адгезии и, как следствие, к повышению механических характеристик композита.

Важной характеристикой композиции «основа – слой с ЭПФ» является прочность сцепления поверхностного слоя с основой, которая описывается следующим выражением (1)

$$\sigma_{\text{сц}} = \sigma_{\text{адг}} - K \cdot \sigma_{\text{ост}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{адг}}$ – адгезионная прочность; K – эмпирический коэффициент, зависящий от условий напыления и свойств напыляемых материалов; $\sigma_{\text{ост}}$ – остаточные напряжения.

При ВГН в формируемом слое возникают термические остаточные напряжения в результате существенно отличающихся характеристик основы и напыляемого материала: температур частиц порошка и поверхности детали; удельных объемов частиц распыляемого материала в

момент попадания их на деталь и частиц в охлажденном состоянии; коэффициентов термического расширения (КТР) материалов покрытия и детали; неравномерности распределения температур по сечению напыляемого слоя. Для анализа остаточных напряжений использовалась математическая модель с учетом изменения во времени температур детали и покрытия. Рассматривая совместное движение материалов покрытия и детали при охлаждении от максимальной температуры нагрева $(T_A)_{\max}$ в завершающей стадии формирования произвольного i -го слоя покрытия, на основе уравнений термомеханики составляющая термического напряжения определялась с учетом условия равенства сил на границе раздела «покрытие - основа» [10]:

$$\sigma_n = -E_n \frac{(\psi_n - \psi_\delta(i)) \cdot (T_A)_{\max} \cdot \zeta(i)}{1 + \zeta(i) - (\zeta(i) \cdot \psi_n - \psi_\delta(i)) \cdot (T_A)_{\max}(i)}; \quad (2)$$

$$\sigma_d = +E_d(i) \frac{(\psi_d(i) - \psi_\Pi) \cdot (T_A)_{\max}(i)}{1 + \zeta(i) - (\zeta(i) \cdot \psi_\Pi + \psi_d(i)) \cdot (T_A)_{\max}(i)}, \quad (3)$$

где i – число слоев покрытия, созданное в условной детали;

$E_\Pi, E_d(i)$ – модуль упругости напыляемого материала и детали;

$\psi_\Pi, \psi_d(i)$ – КТР напыляемого материала и детали;

$$\zeta(i) = \frac{E_\delta(i) \cdot \delta_\delta(i)}{E_n \cdot \delta_{\min}}, \quad (4)$$

Выполненный расчет остаточных напряжений показал, что на границе покрытия толщиной 1 мм и основы, остаточные напряжения близки к нулю, в стальной основе растягивающие остаточные напряжения не превышают 85,7 МПа, в покрытии возникают остаточные сжимающие напряжения, достигающие величины 93,5 МПа.

При поиске оптимального режима высокоскоростного газопламенного напыления с помощью метода планирования эксперимента принималась такая последовательность проведения опытов, которая позволила применить градиентные методы поиска при неизвестной функции, т.е.

приблизённо восстановить закон функционирования объекта по экспериментальным данным. На рис. 6 показано влияние основных технологических параметров ВГН на прочность сцепления с основой поверхностных слоев из материала с ЭПФ *TiNiCu*.

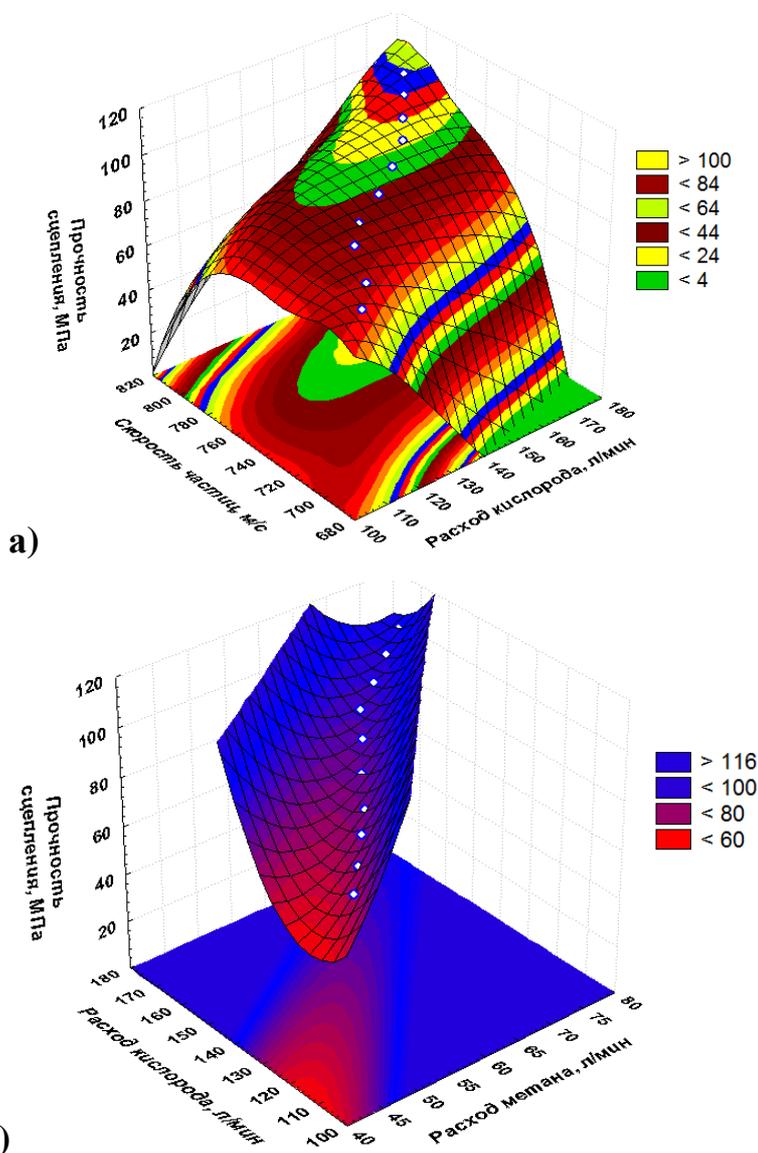


Рис. 6. Влияние параметров технологического процесса на прочность сцепления поверхностного слоя и основы

Электронномикроскопические исследования высокого разрешения (рис. 7) показали, что поверхностные слои *TiNiCu*, формируемые по оптимальным режимам высокоскоростным газопламенным напылением, имеют наноразмерную структуру (рис. 5) с размером зерна 30-170 нм.

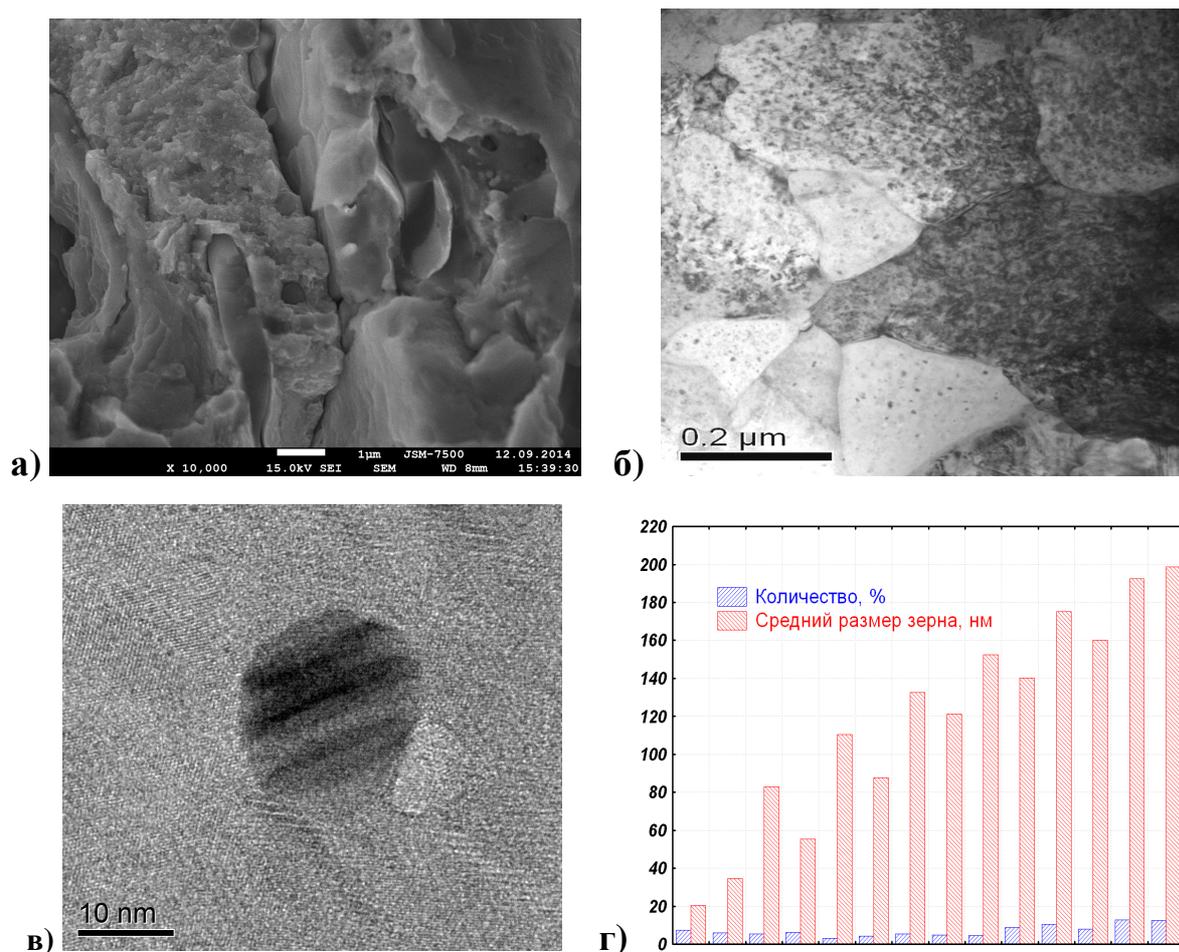


Рис. 7. Микроструктура поверхностного слоя TiNi, полученного ВГН: а) $\times 20000$; б) $\times 120000$; твидовый электронно-микроскопический контраст – в); количественное распределение размера зерен и их процентное содержание в поверхностном слое *TiNiCu* - г);

Для устранения химической неоднородности, возникающей в процессе ВГН проводят гомогенизирующий отжиг, который приводит к полному растворению избыточных фаз, приближая фазовый состав поверхностных слоев к термодинамически равновесному состоянию и улучшению свойств сплавов с ЭПФ. Термическая обработка композиции «сталь – слой с ЭПФ» является промежуточной операцией, в результате которой происходит стабилизация структуры слоя *TiNiCu*, улучшение свойств памяти при уменьшении остаточных напряжений после напыления

TiNiCu. Температура отжига для сплава *TiNiCu* составляла 873К, отжиг проводился в инертной среде (среда аргона) в течение 1ч с последующим охлаждением с печью. Рентгенофазовый анализ, поверхностных слоев сплава *TiNiCu* после отжига при температуре 873К показывает, что покрытие состоит из аустенитной *B2* фазы, мартенситной фазы *B19'* с моноклинной решёткой, оксидов *TiO* (мартенситная фаза *B19'* $\approx 38,5\div 40\%$, аустенитная фаза *B2* $\approx 58,5\div 60,5\%$, *TiO* менее 1,5%). После отжига происходит небольшое увеличение размера зерна, снижается микротвердость. Таким образом, отжиг оказывает существенное влияние на структуру, микротвердость, состав, устранение химической неоднородности поверхностных слоев *TiNiCu*.

Для повышения комплекса функционально-механических свойств (реактивные напряжения, обратимая деформация) поверхностного слоя *TiNiCu* производилась ТМО. При выборе оптимальных режимов ТМО слоя из материала с ЭПФ учитывались ограничения по степени деформации и напряжения. Величина наведенной пластической деформации не должна превышать 6-15%, поскольку более высокая степень деформирования подавляет ЭПФ, увеличивая при этом величину неупругих деформаций.

После проведения отжига с последующим пластическим деформированием слоя *TiNiCu* повышается плотность дефектов кристаллического строения аустенитной *B2*-фазы с формированием мелкозернистого аустенита (размер зерна *TiNiCu* порядка 80-120нм), что приводит к повышению микротвердости. При полном цикле обработки, включающем ВГН механоактивированного порошка *TiNiCu*, отжиг, а затем ППД приводит к формированию однородной наноразмерной структуры. Такая тренировка поверхностного слоя *TiNiCu* в несколько приемов дает сочетание повышенной твердости и стабильных функциональных характеристик ЭПФ.

Выводы

- разработана технология формирования композиции «сталь – поверхностный слой из материала с эффектом памяти формы на основе *TiNiCu*», включающая механическую активацию порошка, нанесение слоя *Ni* + слой *TiNiCu* ВГН, последующую термомеханическую обработку, обеспечивающую формирование наноразмерной структуры, химический и фазовый состав которой соответствует материалу с ЭПФ;

- исследовано влияния механоактивации порошка *TiNiCu* на качество поверхностных слоев, сформированных высокоскоростным газопламенным напылением, показавшее существенное улучшение структуры поверхностного слоя, снижение пористости, повышение адгезии, а, следовательно, повышение функционально-механических свойств;

- для обеспечения необходимого химического состава поверхностного слоя с ЭПФ многокомпонентного состава со значительно отличающимися температурами плавления составляющих компонентов предложено новое конструктивно-технологическое решение устройства для подачи составляющих компонентов в различные зоны газового потока;

- разработана статистическая модель технологического процесса ВГН, позволившая оптимизировать параметры обработки по основному критерию «прочность сцепления поверхностного слоя и основы»;

- выполненный расчет остаточных напряжений показал, что при формировании композиции «сталь – слой с ЭПФ *TiNiCu*» по оптимальным режимам в стальной основе возникают растягивающие, а в поверхностном слое – близкие по величине сжимающие остаточные напряжения, на границе поверхностного слоя с ЭПФ и основы остаточные напряжения близки к нулю.

Литература

1. Razov A. I. Application of Titanium Nickelide-Based Alloys in Engineering. The Physics of Metals and Metallography Vol. 97, Suppl. 1. 2004. P. 97-126.
2. Кристаллогеометрические и кристаллохимические закономерности образования бинарных и тройных соединений на основе титана и никеля /Под ред. А.И. Потекаева. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 312 с.
3. Бледнова Ж.М., Махутов Н.А., Чаевский М.И., Поверхностное модифицирование материалами с эффектом памяти формы. Краснодар: Издательский дом-Юг, 2009. 354 с.
4. Бледнова Ж.М., Русинов П.О. Формирование наноструктурированных поверхностных слоев из материалов с памятью формы на основе TiNi и NiAl // Российские нанотехнологии. 2010. № 3-4. С. 58-64.
5. Бледнова Ж.М., Махутов Н.А., Русинов П.О. Перспективы использования материалов с памятью формы для формирования многофункциональных покрытий на изделиях машиностроительного назначения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2013. Т. 79. - № 11. С. 49-56.
6. Русинов П.О., Бледнова Ж.М., Балаев Э.Ю. Методические подходы и технические решения по формированию наноструктурированных слоев TiNi высокоскоростным газопламенным напылением // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т.15. № 4(2). С. 484-488.
7. Двусторонняя память формы в наноразмерном образце сплава Ti49.5Ni25.5Cu25.0 с частично упорядоченной структурой // Гречишкин Р. М., Ильяшенко С. В. Истомин В. В. и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73. № 8, С. 1138–1140.
8. Пат. 2502829 Российская Федерация, МПК С23С14/56. Вакуумная установка для получения наноструктурированных покрытий из материала с эффектом памяти формы на поверхности детали / Русинов П.О., Бледнова Ж.М., Балаев Э. Ю.; заяв. 31.05.02; опубл. 20.02.04.
9. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий. Новосибирск: СО РАН, 2009. 343 с.
10. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления.– М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. 360 с.

References

1. Razov a. I. Application of titanium nickelide-based alloys in engineering. The physics of metals and metallography vol. 97, suppl. 1. 2004. R. 97-126.
2. Kristallogeometricheskie i kristallohimicheskie zakonomernosti obrazovaniya binarnykh i trojnykh soedinenij na osnove titana i nikelja /pod red. A.i. potekaeva. Tomsk: izd-vo tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2011. 312 s.
3. Blednova zh.m., mahutov n.a., chaevskij m.i., poverhnostnoe modifitsirovanie materialami s jeffektom pamjati formy. Krasnodar: izdatel'skij dom-jug, 2009. 354 s.
4. Blednova zh.m., rusinov p.o. formirovanie nanostrukturirovannykh poverhnostnykh sloev iz materialov s pamjat'ju formy na osnove tini i nial // rossijskie nanotehnologii. 2010. № 3-4. S. 58-64.
5. Blednova zh.m., mahutov n.a., rusinov p.o. perspektivy ispol'zovaniya materialov s pamjat'ju formy dlja formirovaniya mnogofunkcional'nykh pokrytij na izdelijah mashinostroitel'nogo naznachenija // zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov, 2013. T. 79. - № 11. S. 49-56.

6. Rusinov p.o., blednova zh.m., balaev je.ju. Metodicheskie podhody i tehicheskie reshenija po formirovaniju nanostrukturirovannyh sloev tini vysokoskorostnym gazoplammym napyleniem // izvestija samarskogo nauchnogo centra ran. 2013. T.15. № 4(2). S. 484-488.

7. Dvustoronnjaja pamjat' formy v nanorazmernom obrazce splava $ti_{49.5}ni_{25.5}cu_{25.0}$ s chastichno uporzadochennoj strukturoj // grechishkin r. M., il'jashenko s. V. Istomin v. V. I dr. // izvestija ran. Serija fizicheskaja. 2009. T. 73. № 8, s. 1138–1140.

8. Pat. 2502829 rossijskaja federacija, mpk s23s14/56. Vakuumnaja ustanovka dlja poluchenija nanostrukturirovannyh pokrytij iz materiala s jeffektom pamjati formy na poverhnosti detali / rusinov p.o., blednova zh.m., balaev je. Ju.; zajav. 31.05.02; opubl. 20.02.04.

9. Fundamental'nye osnovy mehanicheskoi aktivacii, mehanosinteza i mehanohimicheskij tehnologij. Novosibirsk: so ran, 2009. 343 s.

10. Puzrjakov a.f. teoreticheskie osnovy tehnologii plazmennogo napylenija.– m.: mgtu im. N.je.baumana, 2008. 360 s.