

## СВОЙСТВА ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ С СМК СТРУКТУРОЙ НА ОСНОВЕ КАРБОСИЛИЦИДОВ ТИТАНА

С. Р. ШЕХТМАН<sup>1</sup>, Н. А. СУХОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> shex@inbox.ru, <sup>2</sup> nad\_suhova@mal.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 26.10.2016

**Аннотация.** В работе рассматриваются результаты исследований эксплуатационных свойств покрытий с СМК структурой на основе Ti–C–Si. Приведены исследования электродного потенциала образцов с покрытиями, исследована коррозионная стойкость и термостабильность, описаны испытания на термоциклирование. Приведенные результаты исследования позволяют оценить преимущества покрытий с СМК структурой перед многослойными и однослойными покрытиями.

**Ключевые слова:** свойства покрытий; вакуумные ионно-плазменные технологии; субмикроструктурная структура; плазменный источник.

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации лопатки компрессора газотурбинных двигателей выполняют свое служебное назначение через определенное взаимодействие с другими деталями, а также с окружающей средой, транспортируемыми потоками и другими средами. Они испытывают сильное воздействие высоких температур, усталостных и термоусталостных нагрузок, химически активных элементов.

Внешние слои лопаток компрессора испытывают существенные суммарные статические и динамические нагрузки. В свою очередь эксплуатационные характеристики технических систем тоже главным образом определяются поверхностным слоем, его состоянием и свойствами.

В целях увеличения сопротивления поверхности деталей основным видам повреждений и разрушений, а также для повышения надежности применяемых материалов может быть использован способ формирования на поверхности защитного слоя путем использования вакуумных ионно-плазменных технологий (ВИПТ). Получаемые этим способом покрытия предназначены для защиты металла изделия от высокотемпературных воздействий, коррозионных и эрозионных разрушений, различного вида износа, а также иных внешних негативных воздействий, причем они способствуют повышению эксплуатационных свойств изделия.

Одними из самых перспективных защитных покрытий, являются многослойные композиции [1, 2], а именно ионно-плазменные покрытия с субмикроструктурной структурой (СМК), полученные конденсацией вещества в вакууме с одновременной дополнительной ионной бомбардировкой (ДИБ). Сложность синтеза такого вида защитных покрытий связана с недостаточной проработкой методов формирования слоевых композиций.

Технология синтеза покрытий включает:

- подготовку поверхности под осаждение;
- предварительную очистку и нагрев поверхности;
- формирование многослойного покрытия;
- охлаждение вакуумной камеры в течение одного часа.

Иногда для окончательного формирования покрытия применяют последующую термическую обработку, которая проводится в едином технологическом пространстве.

Метод, совмещающий ВИПТ осаждение покрытий [3] с использованием электродуговых испарителей (ЭДУ) и плазменных ускорителей (в работе используется плазменный ускоритель с накальным катодом (ПИНК)) для генерации квазинейтральных потоков плазмы достаточно хорошо зарекомендовал себя в области синтеза защитных покрытий из различных материалов. Использование этого метода позволяет формировать нанослой, причем варьируя частотой

планетарного вращения, давлением и используя ЭДУ из различных материалов можно получить осаждением слоев различных величин с различным химическим составом.

Полученные нанослои размером менее 100 нм придают деталям с ВИП покрытиями совершенно новые свойства [4, 5]. Так называемые размерные эффекты проявляются в изменении реакционной способности, структуры, характеристик проводимости, температуры плавления и механических свойств.

Получаемые покрытия с СМК структурой сочетают в себе свойства слоистых систем и специфические характеристики нанобъектов благодаря большому количеству слоев и их толщине в нанометровом диапазоне.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ

Для синтеза покрытий, из микро- и нанослоев системы Ti-C-Si использовалась промышленная модернизированная установка ННВ-6.6-И1. Для проведения эксперимента были изготовлены образцы из жаропрочной стали 13X11H2BMФ. Покрытие формировалось в процессе чередования слоев Ti и C-Si из плазмы, создаваемой ЭДИ, расположенными под определенным углом к поверхности обрабатываемой детали. Испарители были расположены по бокам вакуумной камеры установки под углом 120°. Синтезировались многослойные покрытия состоящих из 3 слоев, 8 слоев и покрытия с СМК структурой. Толщина сформированного покрытия и размеры слоев определялись режимами обработки и составляла 5–6 мкм.

Покрытия, сформированные по предлагаемой технологии характеризуются высокой адгезией к материалу подложки. Кроме того, исследование адгезии путем вдавливания алмазной

пирамидки показало отсутствие растрескивания материала покрытия вблизи зоны воздействия. Данное испытание косвенно свидетельствует о высокой адгезии покрытия. Исследования на микротвердость образцов с покрытием с СМК структурой показало, что она находится в пределах 3,5–3,86 ГПа при твердости основного материала 2,34–2,51 ГПа. Замеры микротвердости выполнены на микротвердомере ПМТ-3 (0,50 Н).

Исследование стойкости к коррозии образцов с покрытиями определялись по изменению массы образца в результате агрессивного действия коррозионной среды (камера тропического климата при  $T = 300^{\circ}\text{C}$  в 3%-ный раствор NaCl, 9 циклов) (табл. 1).



**Рис. 1.** Испытания на коррозионную стойкость. Подложка 13X11H2BMФ:  
a – трехслойное покрытие Ti-(C-Si)-Ti;  
b – покрытие с СМК структурой

После проведения коррозионных испытаний визуальный осмотр поверхности (рис. 1) показал, что на поверхности образцов с трехслойным покрытием присутствует точечная коррозия. На образцах с покрытием с СМК структурой, точечная коррозия отсутствует, наблюдается лишь изменение цвета покрытия.

Таблица 1

Скорость коррозии образцов с покрытиями

№	Тип покрытия	Масса, г.		Площадь образцов, м <sup>2</sup>	Скорость коррозии, г/м <sup>2</sup> ·ч
		до испытания	после испытания		
1	Исходный	4,39355	4,38625	0,0015198	0,0222379
2	3-слойное покрытие	4,58860	4,58200		0,0201055
3	Многослойное покрытие	3,76240	3,75635		0,0184301
4	Покрытие с СМК структурой	4,39755	4,39245		0,0155361

Скорость протекания коррозии на образцах с покрытием с СМК структурой на 22 % меньше, чем на образцах с 3-слойным покрытием и на 30 % чем на образцах без покрытия.

Исследования электродного потенциала, проводимое с целью определения эффективности покрытия с СМК структурой системы Ti-C-Si в качестве защитных покрытий проводились по общепринятой методике наблюдением изменения потенциала образцов во времени. Использовался блок универсального вольтметра с диапазоном от 7 до 35 В. Электролит – 5% раствор NaCl. Электрод сравнения – хлорсеребряный (AgCl) полуэлемент, погруженный в раствор KCl (насыщенный).

Электродный потенциал многослойного покрытия, нанесенного на образцы из стали 13X11H2BMФ, по сравнению с покрытием с СМК структурой выше на 20–25 %. Следовательно, поверхность с покрытием на основе Ti-C-Si с СМК структурой в большей степени пассивна, что свидетельствует о ее более высокой стойкости к коррозии. Это может быть объяснено увеличением числа границ между слоями, что тормозит процессы коррозии на границе среда–металл и препятствует проникновению внешней агрессивной среды вглубь покрытия (рис. 2).

Анализ образцов с покрытиями системы Ti-C-Si, полученных ВИП методом, показал, что осажденные с использованием плазменного асистирувания покрытия, имеющие СМК структуру, обеспечивают большую защиту от коррозии.

Кроме того, повышение коррозионных свойств может быть объяснено увеличением плотности покрытия, измененной структурой покрытия и снижением остаточных напряжений в покрытии.

Одними из важнейших эксплуатационных характеристик для лопаток компрессора ГТД, наряду с коррозионной и эрозионной стойкостью, усталостной прочностью являются термическая стабильность и термостойкость осажденных защитных покрытий.

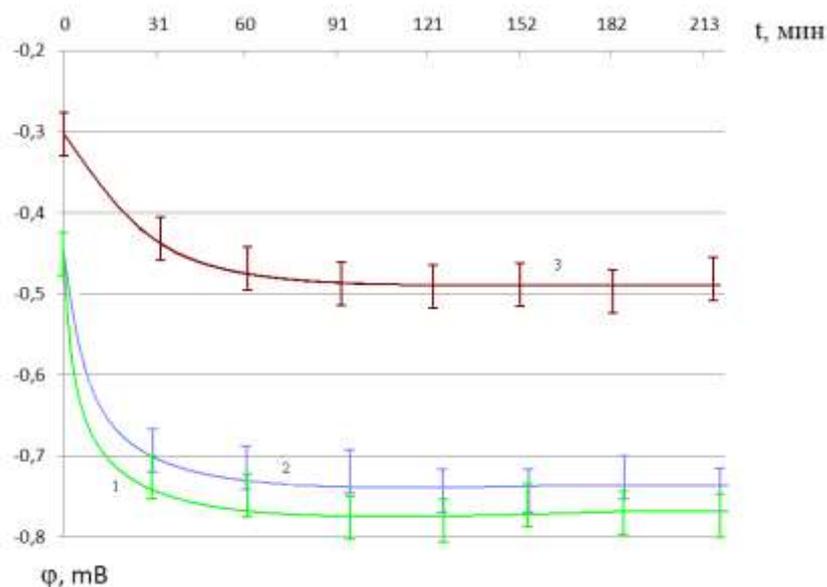
Анализ литературных источников, экспериментальных работ показал, что ВИП покрытия на основе карбидов металлов способны сохранять свои эксплуатационные характеристики и функциональное назначение до температур выше которых они теряют свои свойства.

Для проведения исследования влияния температуры на многослойное покрытие руководствовались тремя основными факторами: длительностью воздействия температуры, скоростью изменения и величиной температуры.

Методика проведения исследования термической стабильности (по твердости) заключается в следующем: образцы с покрытиями помещают в печь, нагревают до  $T = 600^{\circ}\text{C}$ , после чего выдерживают в течение заданного времени (4, 8 и 16 ч) и определяют микротвердость.

На рис. 3 представлено изменение от времени нагрева микротвердости покрытий.

Проведенные исследования термической стабильности покрытий системы Ti-C-Si на материалах ВТ6, ЭП718 ИД, ЭИ961-Ш



**Рис. 2.** Электродный потенциал: Подложка 13X11H2BMФ:  
1 – исходное состояние; 2 – многослойное покрытие;  
3 – покрытие с СМК структурой

( $T_{\text{нагр.}} = 400\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{выдер.}} - 4, 8, 16$  часов) показали, что покрытие с СМК структурой обладает более высокой термостойкостью по сравнению с многослойным покрытием. Так микротвердость покрытия с СМК структурой после выдержки при  $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 16 часов уменьшается на 10 %, в то время как микротвердость многослойного покрытия уменьшается на 25–30 % (рис. 3).

Наибольшее значения микротвердости поверхности достигает образец с покрытием с СМК структурой после проведения отжига при температуре  $200^{\circ}\text{C}$ , что объясняется завершением формирования карбидов и карбосилицидов титана в процессе термической обработки.

При запуске газотурбинного двигателя происходит изменение температуры по циклическому принципу, вследствие чего основной причиной разрушения может стать термическая усталость.

Для многослойного покрытия на основе Ti-C-Si экспериментальные данные по влиянию толщины слоев и его составляющих, а также влияние последующей термической обработки на стойкость покрытия практически отсутствуют. Исследования проводятся по малоциклово-му нагружению. Как показывают многочисленные эксперименты, при термоциклировании сначала разрушается покрытие.

Методика проведения исследования основана на многократном нагреве и охлаждении до разрушения покрытия. Термостойкость покрытия в первую очередь зависит от факторов, которые уменьшают остаточные напряжения:

- равенство коэффициентов терморасширения подложки и покрытия;
- повышение теплопроводности;
- уменьшение толщины покрытий;
- применение покрытий с мелкодисперсной структурой и многослойных покрытий.

Для оценки работоспособности многослойных покрытий системы Ti-C-Si были проведены исследования на термоциклирование. Условия выбирались близкими к условиям эксплуатации. Образцы загружались в печь и путем многократного нагрева до  $T = 600^{\circ}\text{C}$  выдерживались, затем они охлаждались на воздухе в течение 5 минут.

Результаты экспериментов по термоциклированию образцов с многослойными покрытиями системы Ti-C-Si представлены в табл. 2.

Как показали многочисленные эксперименты, покрытие с СМК структурой обладает большей термостойкостью, что объясняется меньшими остаточными напряжениями, приводящими к повышению упругопластических свойств для «покрытие–подложка».

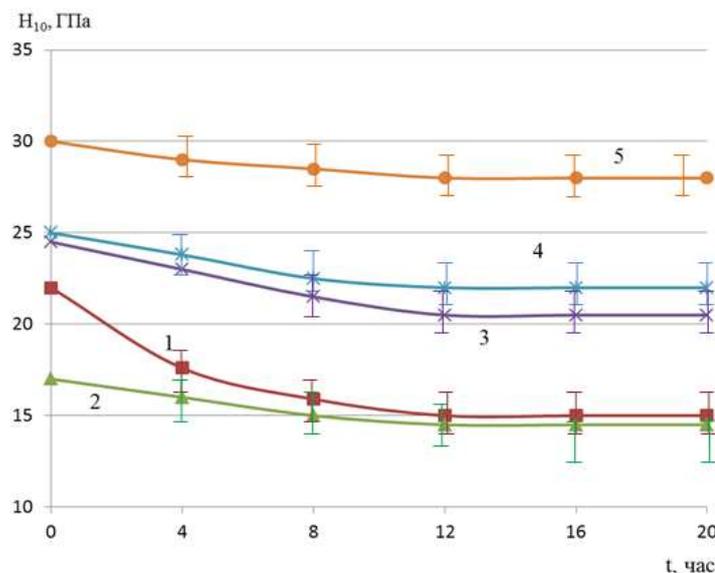


Рис. 3. Зависимость результатов замера микротвердости от времени нагрева при  $T=600^{\circ}\text{C}$ .

Подложка ЭП718–ИД:

- 1 – трехслойное покрытие, 2 – трехслойное покрытие с т/об ( $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),  
 3 – покрытие с СМК структурой с т/об ( $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 4 – покрытие с СМК структурой,  
 5 – покрытие с СМК структурой с т/об ( $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Таблица 2

## Количество циклов до разрушения при термоциклировании

Вид покрытия	Многослойное покрытие	Покрытие с СМК структурой
Количество циклов	740	>1100

При чередовании тонких слоев переменной твердости и различного фазового состава покрытие с СМК структурой показывает лучшие эксплуатационные свойства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что по сравнению с многослойным покрытием микротвердость покрытия с СМК структурой выше на 20–50 %, электродный потенциал ниже на 20–25 %, термическая стабильность выше на 30%, что связано с увеличением содержания карбида и карбосилицида титана в покрытии с СМК структурой.

Установлено, что вакуумный отжиг покрытия с СМК структурой при температуре 200–300°C и  $\tau = 20$  мин. приводит к повышению микротвердости на 20–40 %, понижению электродного потенциала поверхности на 30–35 %, повышению термической стабильности на 25–30 %. Это объясняется тем, что в процессе термической обработки происходит более активное протекание межслоевых диффузионных процессов, обеспечивающих увеличение содержания карбида и карбосилицида титана в покрытии с СМК структурой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.С. Мухин, С.Р. Шехтман Поверхность технического объекта: физика, химия, механика, нанотехнология модифицирования / Вестник УГАТУ. – Уфа: -2007. - Т. 9., №1 (19). С. 84 – 91.
2. Будилов В.В., Мухин В.С., Шехтман С.Р. Нанотехнологии обработки поверхности деталей на основе вакуумных ионно-плазменных методов: физические основы и технические решения. М.: Наука, 2008. 194 с.
3. В. Будилов, Р.М. Киреев, С.Р. Шехтман Технология вакуумной ионно-плазменной обработки. – М.: МАИ, 2007. – 155 с
4. Головин Ю.И. Введение в нанотехнологию. –М.: Издательство Машиностроение – 1, 2003. – 112 с. с илл
5. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. – М: Издательский центр «Академия», 2005. – 192 с.

## ОБ АВТОРАХ

**ШЕХТМАН Семен Романович**, декан вечернего факультета УГАТУ при УМПО. Дипл. инженера-механика (УГАТУ, 1993). Д-р техн. наук по порошковой металлургии и композиционным материалам (МАТИ, 2015) Иссл. в области вакуумных ионно-плазменных покрытий

**СУХОВА Надежда Александровна**, доцент каф. Экономики предпринимательства. Дипл. инженера-механика (УГАТУ, 1995). Канд. техн. наук по технологии машиностроения (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. управления технологичностью и вакуумных ионно-плазменных покрытий.

## METADATA

**Title:** Properties of vacuum ion-plasma coatings, surface modification of ion-current discharge.

**Authors:** S. R. Shechtman<sup>1</sup>, N. A. Suhova<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>shex@inbox.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 3 (73), pp. 44-48, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The paper discusses the results of the performance properties of the coatings research с SMC structure on the basis of Ti-C-Si. The results of studies of the electrode potential of samples with coatings studied corrosion resistance and thermal stability tests performed on thermal cycling. These findings allow us to estimate the benefits in coatings with SMC structure to multilayer and monolayer coatings.

**Key words:** coating properties; vacuum ion-plasma technologies; submicro crystal structure; plasma source.

**About authors:**

**SHECHTMAN Semen Romanovich**, Dean of the Faculty of USATU evening at UMPO. Dipl. Mechanical Engineer (USATU, 1993). Dr. Sc. by powder metallurgy and composite materials (MATI 2015) Inst. In the field of vacuum ion-plasma coatings

**SUHOVA Nadezhda Alexandrovna**, docent of Department. Economics Entrepreneurship. Diploma. Mechanical Engineer (USATU, 1995). Kand. tehn. science in mechanical engineering (USATU, 2005). Inst. in the region. Management processability and vacuum ion-plasma coatings