

В. С. Мухин, В. В. Будилов, С. Р. Шехтман

## МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ПОКРЫТИЙ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ НАНЕСЕНИЯ НА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГТД

В работе рассматриваются вакуумные ионно-плазменные покрытия, создаваемые на лопатках компрессора ГТД, приводятся результаты исследования эксплуатационных свойств. Разработана технология нанесения многослойных покрытий с субмикроструктурной структурой. Полученные результаты исследования позволяют оценить преимущества покрытий с субмикроструктурной структурой перед многослойными и однослойными покрытиями. *Вакуумные ионно-плазменные покрытия; многослойные покрытия; исследование свойств покрытий*

### ВВЕДЕНИЕ

В подавляющем большинстве случаев разрушение деталей авиационных двигателей начинается с поверхности либо в тонком приповерхностном слое [2], поэтому чрезвычайно важно и экономически более целесообразно разработать технологии получения защитных и упрочняющих покрытий, свойства которых по прочности и пластичности недостижимы для традиционных моно- и поликристаллических структур. При этом возможна реализация одного из принципов нанотехнологии: создание объекта осуществляется не «сверху-вниз» (например, когда при формообразовании снимается припуск с заготовки), а «снизу-вверх», когда поверхность «достраивается» до необходимых размеров детали, причем последняя приобретает новое качественное состояние (по прочности, пластичности, износостойкости, коррозионной стойкости и др.) [3–5].

В газотурбинных двигателях (ГТД) наиболее нагруженными деталями являются рабочие лопатки компрессора и турбины. Они работают в условиях высоких и быстроменяющихся температур и агрессивной газовой среды. В материале лопатки возникают большие напряжения растяжения от центробежных сил и значительные вибрационные напряжения изгиба и кручения от газового потока, амплитуда и частота которых меняются в широких пределах. Быстрая и частая смена температуры приводит к возникновению в лопатках значительных термических напряжений.

Практика эксплуатации двигателей показывает, что преждевременное разрушение лопаток

компрессора и турбины обычно носит усталостный характер. Лопатки турбины чаще обрываются по перу, реже – по замку [2, 3]. В большинстве случаев усталостные разрушения лопаток вызываются изгибными колебаниями. С увеличением продолжительности эксплуатации вероятность выхода лопаток из строя возрастает. Сопротивление усталости основных силовых деталей двигателя можно повысить металлургическими, конструктивными, технологическими и эксплуатационными методами, причем технологические методы являются наиболее эффективными.

Кроме того, наблюдается тенденция увеличения защитных свойств деталей применяемых в настоящее время для целого ряда деталей авиационных двигателей, работающих в условиях высоких температур, нагрузок и агрессивных сред. В связи с чем продолжается поиск новых способов и процессов нанесения покрытий в направлении создания многослойных композиций, обладающих более высокими эксплуатационными свойствами по сравнению с однослойными [1].

Метод вакуумно-плазменного нанесения покрытий, характеризующийся возможностью получения поверхностных слоев со специальными физико-механическими свойствами, позволяющий защитить поверхность детали на протяжении всего ресурса работы, получил наибольшее распространение, так как он характеризуется практически полной универсальностью технологического процесса, высокой скоростью нанесения покрытий, высокой воспроизводимостью параметров на каждой операции и практически полным отсутствием экологических проблем.

Кроме того, метод позволяет получать многослойные покрытия, которые могут состоять из периодически расположенных слоев из различных материалов нанометровой толщины, например, чередующихся Ti, Ti<sub>2</sub>N и TiN, с характерным размером толщины слоев менее 100 нм и количеством слоев до нескольких десятков, обладают высокими механическими и эксплуатационными свойствами [3, 4]. Благодаря особенностям строения, ультратонкой толщине слоев и их большому количеству, а также возможности плотного сопряжения слоев различных материалов, многослойные покрытия сочетают в себе качества слоистых систем и специфические свойства нанообъектов.

Многочисленные исследования [2, 3] показали, что с уменьшением толщины пленки до 100 нм, ее поверхностные свойства начинают доминировать над объемными. При этом тонкие пленки имеют физические свойства, которые существенно отличаются от свойств объемных образцов из того же материала. Они зависят не столько от химического состава, сколько от формы и размеров наноструктур и во многих случаях на порядок превосходят характеристики монолитных материалов. Объясняется это более совершенной структурой сверхтонких пленок и более высокой внутренней энергией за счет перераспределения вклада в прочностные свойства материала поверхности по сравнению с объемом.

На основании вышеизложенного была разработана технология осаждения многослойного покрытия системы Ti-TiN с субмикроструктурной структурой. Она предусматривает проведение в одном технологическом цикле предварительную ионную очистку поверхности плазмой несамостоятельного сильноточного диффузионного разряда, нагрев деталей ионами металла, нанесение многослойных покрытий в условиях плазменного ассистирования.

## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Синтез многослойных покрытий системы Ti-TiN осуществлялся на модернизированной промышленной установке ННВ 6,6-И1 в условиях плазменного ассистирования с использованием несамостоятельного сильноточного диффузионного разряда генерируемого плазменным источником «ПИНК» [4] в среде инертного газа аргона.

На образцы, выполненные из материалов 13Х11Н2ВМФ, ВТ6 наносилось многослойное (8 слоев), трехслойное и покрытие с субмикрок-

ристаллической структурой (СМК). Толщина покрытия и его слоев задавались режимами напыления. Толщина покрытий определялась весовым методом и микроструктурными исследованиями и составляла 5–6 мкм, состоящие из 2...20 слоев с различной толщиной от 3 мкм до 300 нм [1–3].

Испытания на усталостную прочность образцов проводились на электродинамическом вибростенде в нормальных условиях по первой изгибной форме колебаний на лопатках методом «Лестница»,  $\sigma_{нач} = 480$  МПа на базе  $N = 2 \times 10^7$  циклов. На лопатки наносилось покрытие на основе Ti-TiN, однослойное, многослойное (трехслойное) и наноструктурированное.

## 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Процесс осаждения многослойных покрытий с СМК структурой можно условно разделить на четыре основных этапа. Первый этап процесса – ионная очистка и активация центров адсорбции на обрабатываемой поверхности несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом производится с помощью плазменного источника «ПИНК» в среде инертного газа аргона при давлении  $10^{-1}$  Па, отрицательном смещении (900–1100 В) на подложке, токе разряда 30–40 А, длительность обработки – 1...2 минуты до прекращения возникновения микродуг. Такой режим позволяет избежать внедрения ионов металлической плазмы на стадии предварительной очистки, исключить привязывание микродуг к поверхности, снизить температуру предварительного нагрева до 100–200 °С.

На втором этапе формирования многослойного покрытия осуществляется взаимодействие частиц из ускоренного плазменного потока электродугового испарителя (ЭДИ) с титановым катодом с поверхностью, поверхностная миграция атомов и ионов титана, ионное перемешивание адсорбированных частиц. Формируется Ti слой. В качестве катода используется технически чистый титан марки ВТ-1.0.

На третьем этапе в вакуумную камеру подается рабочий газ азот (N<sub>2</sub>) и происходит формирование слоя покрытия. На поверхности образуется Ti<sub>2</sub>N.

На четвертом этапе количество рабочего газа увеличивают для формирования на поверхности TiN. Затем с помощью системы напуска рабочего газа происходит снижение подачи азота в вакуумную камеру и на поверхности происходит осаждение слоя покрытия Ti<sub>2</sub>N либо чистого

Ti в зависимости от получаемого состава покрытия. Осаждения Ti из плазмы, генерируемой электродуговым испарителем осуществляется в условия плазменного ассистирования. Третий и четвертый этапы повторяются в зависимости от заданного количества слоев.

В процессе нанесения покрытия осуществляется равномерное планетарное вращение обрабатываемой детали относительно собственной оси и одновременно вокруг оси стола, благодаря чему обеспечивается равномерность осаждения покрытий. Процесс осуществляется при температуре 400–450 °С. Нагрев обусловлен энергией, приносимой осаждаемыми частицами. Толщина покрытия 5–7 мкм. Количество слоев и их толщина задается режимами напыления.

Технологический процесс, разработанный на основе технологии осаждения покрытий с СМК структурой, представлен на рис. 1.

Чтобы получить многослойные вакуумные ионно-плазменные покрытия с субмикросталлической структурой необходимо соблюдать следующие основные правила:

1. Многослойные композиции должны состоять из множества сверхтонких (менее 100 нанометров) слоев.

2. При синтезе необходимо стремиться поддерживать температуру конденсации близкой к минимальной (350–450 °С).

С целью исследования структуры нанесенного материала и определения его фазового состава были проведены рентгеноструктурные исследования (рис. 2). Анализ физического уширения рентгеновских пиков исследуемого образца проводили путем сравнения интегральной ширины дифракционных пиков на половине их высоты с шириной рентгеновских пиков эталона. Анализ диаграмм, приведенных на рис. 2, позволяет сделать вывод, что дифракционные пики рентгенограммы для образцов, полученных по предлагаемой технологии (б) по величине физического уширения и по конфигурации, характеризуются значительным физическим уширением вследствие малого размера зерна.

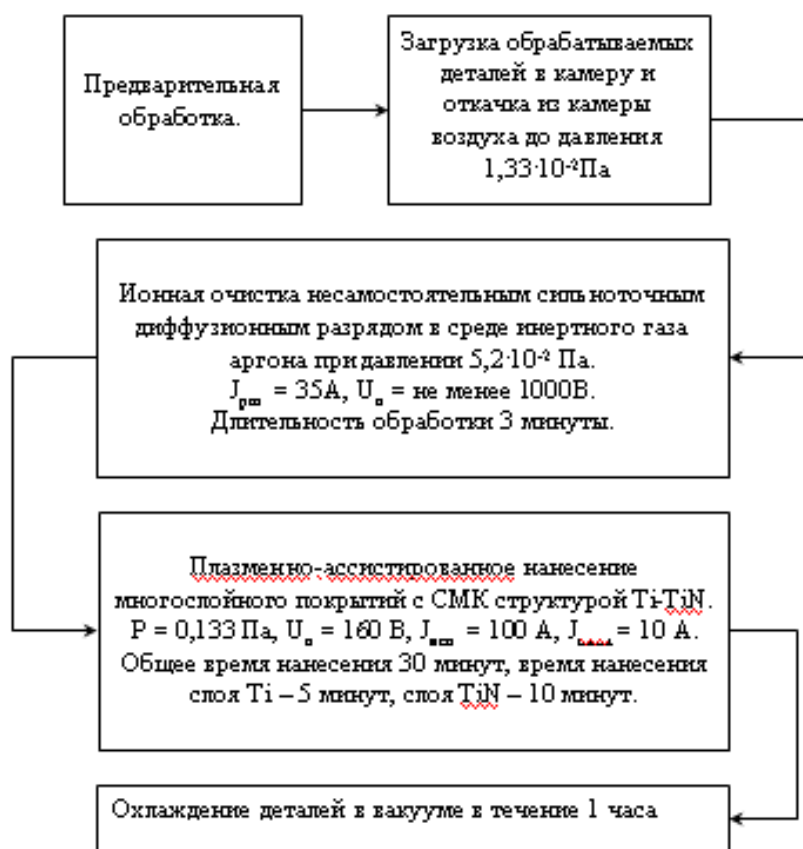


Рис. 1. Технологический процесс получения многослойного покрытия с СМУ структурой

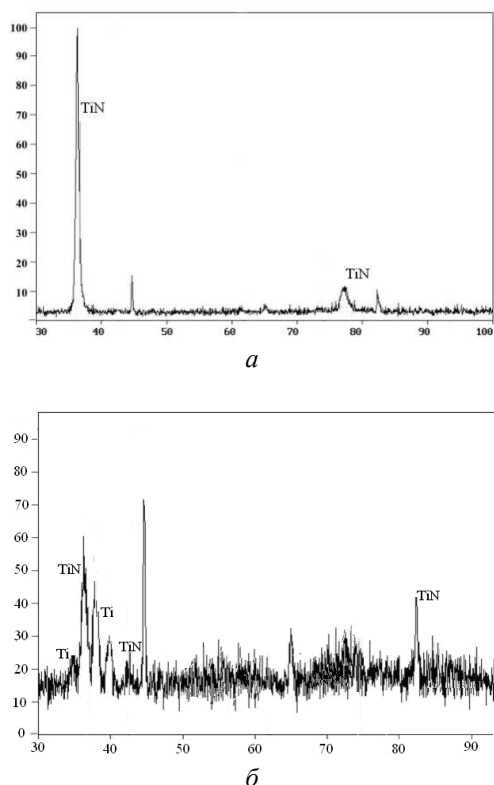


Рис. 2. Рентгенограммы однослойного (а) и многослойного (б) покрытия с СМК структурой композиции Ti-TiN

Усталостные испытания деталей, изготовленных из материала ВТ-6 с многослойными покрытиями Ti-TiN. При этом имитируют все виды нагружения и нагрева, максимально приближающиеся к эксплуатационным. Обязательным условием при таких испытаниях является реализация заданного напряженно-деформированного состояния в деталях в целом и в опасном сечении. Одним из критериев правильности выбора схемы испытаний является идентичность получаемых разрушений разрушениям деталей, наблюдаемых в эксплуатации.

Испытания проводились на вибродинамическом стенде. Испытания проводятся на базе  $N = 2 \times 10^6$  циклов на 6 лопатках.

Для определения влияния одно-, многослойных покрытий на усталостную прочность были проведены исследования на лопатках компрессора и на образцах из авиационных материалов: 13X11H2B2MФ-Ш (ЭИ961-Ш) и титанового сплава ВТ6.

Исследование влияния ионно-плазменных покрытий на усталостную прочность образцов из стали ЭИ961-Ш и титанового сплава ВТ 6. Испытания проводились на электродинамическом вибростенде в нормальных условиях.

$\sigma_{нач} = 480$  МПа (для ЭИ961-Ш) и  $\sigma_{нач} = 560$  МПа (для ВТ-6) на базе  $N = 2 \times 10^7$  циклов. На цилиндрические образцы наносилось покрытие на основе Ti-TiN, однослойное, многослойное (трехслойное) и покрытие с СМК структурой.

Таблица  
Результаты исследования  
на усталостную прочность

| Материал | Состояние обрабатываемой детали | Предел усталости, МПа | Изменение предела усталости, % |
|----------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| ЭИ961-Ш  | Без покрытия                    | 480                   | –                              |
|          | Покрытие Ti-N                   | 420                   | – 12,5                         |
|          | Трехслойное покрытие            | 430                   | – 10,4                         |
|          | Покрытие с СМК структурой       | 460                   | – 4,2                          |
| ВТ 6     | Без покрытия                    | 560                   | –                              |
|          | Покрытие Ti-N                   | 480                   | – 14,2                         |
|          | Трехслойное покрытие            | 490                   | – 12,5                         |
|          | Покрытие с СМК структурой       | 520                   | – 7,14                         |

Для материала ВТ6 установлено, что предел усталости для покрытия с субмикроструктурной структурой выше на 10,3 % по сравнению с однослойным покрытием и на 8,3 % выше чем на образце с трехслойным покрытием (рис. 3).

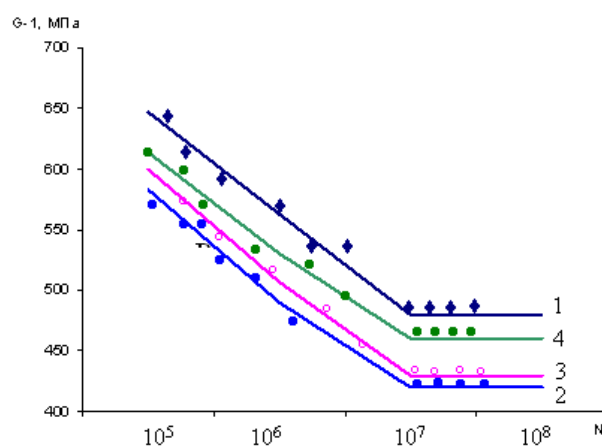


Рис. 3. Влияние вида покрытия на предел выносливости. Подложка – 13X11H2B2MФ-Ш. 1 – исходное состояние без покрытия; 2 – покрытие Ti-N; 3 – трехслойное покрытие; 4 – многослойное покрытие с СМК структурой

## ВЫВОДЫ

Результаты испытания образцов на усталость показывают, что наличие многослойного покрытия с субмикроструктурной структурой не приводит к снижению усталостной прочности. В то же время усталостная прочность образцов с многослойными покрытиями с субмикроструктурной структурой выше, чем у образцов с трехслойным и однослойным покрытием.

Повышение усталостной прочности может быть объяснено снижением остаточных напряжений в многослойных покрытиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белоус В. А.** Разработки ННЦ ХФТИ в области ионно-плазменных обработок конструкционных материалов: обзор. Харьковская научная ассамблея, 2006. С. 60–73.
2. Перспективы применения ионной обработки в авиадвигателестроении / Каблов Е. Н. [и др.] // *Авиационная промышленность*. 1992. № 9. С. 9–12.
3. **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.
4. **Мухин В. С., Шехтман С. Р.** Поверхность технического объекта: физика, химия, механика, нанотехнология модифицирования // *Вестник УГАТУ*. 2007. Т. 9, № 1(19). С. 84–91.
5. **Пул Ч., Оуэнс Ф.** Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2005. 336 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Мухин Виктор Сергеевич**, проф. каф. технологии машиностроения. Засл. деятель науки и техники РБ и РФ. Чл.-кор., акад. наук АН РБ. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1962). Д-р техн. наук (МАИ, 1975). Иссл. в обл. прочности, надежности и долговечности деталей технол. методами.

**Будилов Владимир Васильевич**, проф. каф. технологии машиностроения. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1969). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (МАИ, 1995). Иссл. физических процессов в низкотемпературной плазме, вакуумных ионно-плазменных технологий обработки деталей ГТД.

**Шехтман Семен Романович**, и.о. декана ВФ декана УГАТУ при УМПО. Дипл. инженер (УГАТУ, 1993). Канд. техн. наук по тепл. двигателям ЛА (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. вакуумных ионно-плазм. технологий.