

Р. Р. ВАЛИЕВ, Ю. М. ДЫБЛЕНКО, А. В. ГАНЕЕВ, В. С. ЖЕРНАКОВ

## МИКРОСТРУКТУРА И ПОВЕДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ TiN НА ЛОПАТКАХ ГТД, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ТИТАНОВОГО УМЗ СПЛАВА ВТ-6

Исследована микроструктура ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ-6, использованного для изготовления лопаток 4-й ступени компрессора низкого давления ГТД, а также наноструктурного многослойного покрытия TiN. Показано, что покрытие имеет нанокристаллическую структуру. Установлено также изменение структуры сплава после нанесения покрытия и ионной имплантации, что привело к некоторому повышению твердости материала. *Титановый сплав ВТ-6; ультрамелкозернистая структура; лопатка компрессора низкого давления; ионно-плазменное покрытие TiN; ионная имплантация*

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных методов повышения ресурса и надежности лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов является использование защитных покрытий, полученных ионно-имплантационной и вакуумно-плазменной обработкой с использованием тугоплавких химических соединений, прежде всего TiN, TiAlN, TiZrN и др. [1, 2]. Широко применяемые в машиностроении и металлообработке, такие покрытия характеризуются высокими значениями твердости (до 35 ГПа) и низкими коэффициентами трения.

Проведение ионной имплантации дополнительно упрочняет и активирует поверхность, создает плавный переход физико-химического состояния покрытия в матрицу, устраняет границу раздела покрытие – матрица [3]. Например, ионная имплантация азота увеличивает усталостную прочность лопатки за счет изменения дислокационной структуры ее поверхности и образования в ней упрочняющих нитридных фаз: TiN и Ti<sub>2</sub>N. В последние годы разработаны методы получения многослойных наноструктурных покрытий [4]. Такие покрытия обладают комплексом физико-механических характеристик, существенно превышающих соответствующие показатели для обычных покрытий того же состава. Традиционно для изготовления лопаток компрессора ГТД используется титановый сплав ВТ-6. Ещё одним перспективным направлением повышения их свойств является использование титанового сплава с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, получаемой методами интенсивной пластической деформации [5].

Целью данной работы явилось изучение микроструктуры многослойного покрытия из нитрида титана, а также определение изменений структу-

ры лопатки, изготовленной из УМЗ сплава ВТ-6 при нанесении защитного покрытия.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для создания УМЗ структуры был применен метод интенсивной пластической деформации (ИПД) путём равноканального углового прессования [5]. Лопатки компрессора из титанового УМЗ сплава обычно получают путем объемной изотермической штамповки, в том числе с использованием сверхпластической деформации, обычно в интервале температур от 850 до 950 °С. Применение наноструктурных заготовок при формообразовании лопаток позволило провести изотермическую штамповку в условиях низкотемпературной сверхпластичности, т.е. при температурах 600...650 °С [5]. Такой температурный диапазон позволяет, во-первых, наряду с экономией энергоресурсов использовать более дешевые материалы для штамповой оснастки. Во-вторых, в данном температурном интервале деформации уменьшается толщина поверхностного альфированного слоя заготовки, что значительно снижает объем последующей механической обработки.

Многослойное вакуумно-плазменное покрытие было получено с помощью двух электродугowych испарителей со сменными катодами из титанового сплава ВТ-1-0 (Ti) и многокомпонентного сплава TiAlZrMoV ( $\eta$ Ti). Архитектуру покрытий формировали путём чередования времени нанесения каждого отдельного слоя и количества напыляемого материала с каждого катода. Ионно-плазменная модификация образцов ионами азота осуществлялась газовым плазмогенератором «ПИНК» [6]. Напыление покрытий проводилось в условиях ионного ассистирования.

Для исследования структуры покрытий и самого материала лопатки использовали просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100, что позволило выявить особенности их дислокацион-

ной структуры. Фольги изготавливали, вырезая диск диаметром 3 мм на алмазном круге и утоня на шлифовальной машине до 0,1 мм, далее методом электрополировки получали отверстие. Также для улучшения качества фольг была разработана новая методика утонения при помощи установки ионного травления JEOL Ion Slicer EM-09100IS. Поверхность обрабатывали потоком ионов по всей поверхности с напряжением 8 кВ.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Интенсивная пластическая деформация привела к измельчению структурных составляющих сплава, что характеризовалось уменьшением размеров первичных глобулей  $\alpha$ -фазы в среднем до 5 мкм, а также формированием УМЗ структуры со средним размером зёрен  $\alpha$ -фазы 240 нм, объёмная доля которой составляла более 70 % (рис. 1).

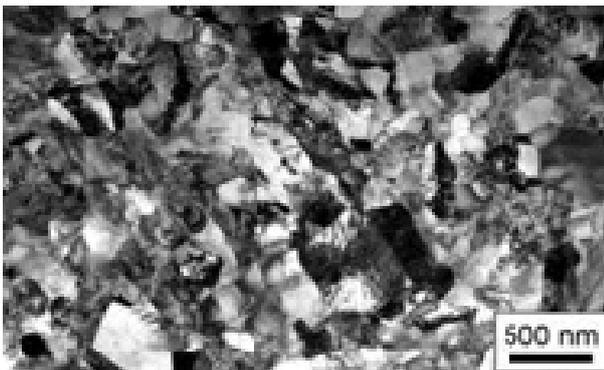


Рис. 1. ПЭМ фотография микроструктуры УМЗ сплава VT-6 после ИПД

Полученная фольга из УМЗ сплава с покрытием была исследована также в растровом электронном микроскопе (РЭМ), полученная фотография показана на рис. 2.

На рис. 2 видно отверстие, полученное при электрополировке с дальнейшим утонением в ионной установке. Покрытие возле отверстия является очень хрупким, поэтому очень быстро разрушается. Толщина этого покрытия составляет 12–15 мкм, но отдельные слои в РЭМ не удалось разрешить. Далее фольгу исследовали в просвечивающем электронном микроскопе по методике, показанной на рис. 3.

На рис. 4 приведены ПЭМ изображения микроструктуры первого слоя покрытия вблизи отверстия. Как видно, его микроструктура состоит из нанозёрен размером 50–60 нм. Электронная дифракция показала, что это зерна титана, то есть первый слой является нанокристаллическим титаном.

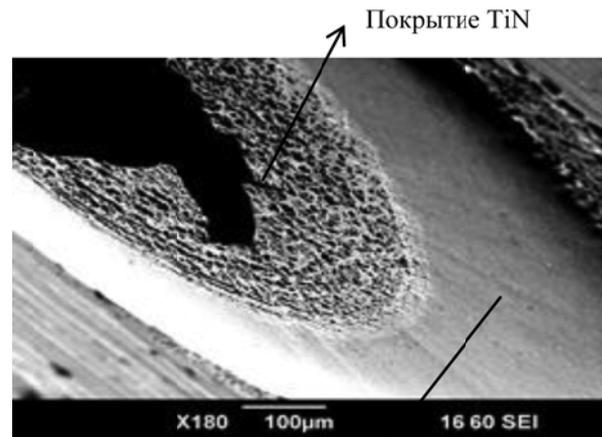
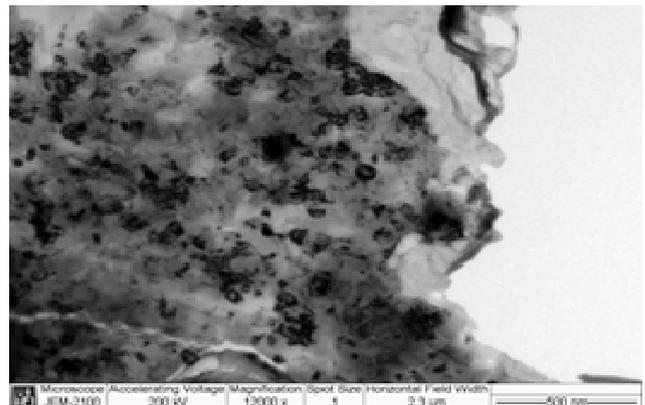


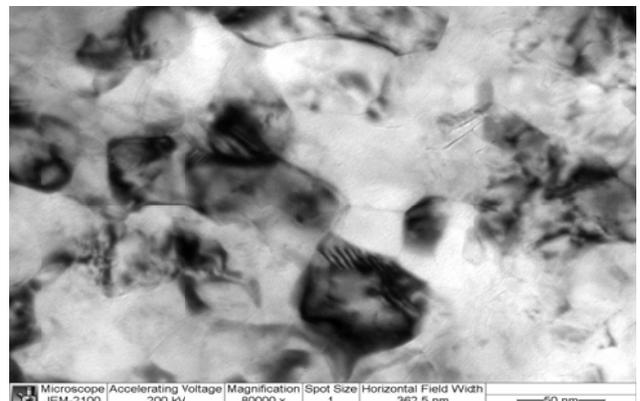
Рис. 2. Общий вид фольги в РЭМ



Рис. 3. Методика наблюдения фольги из многослойного покрытия в ПЭМ

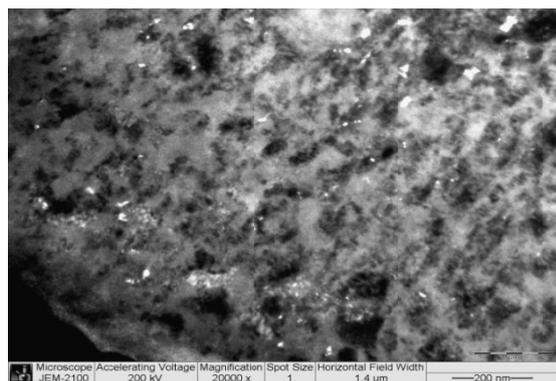


*a*

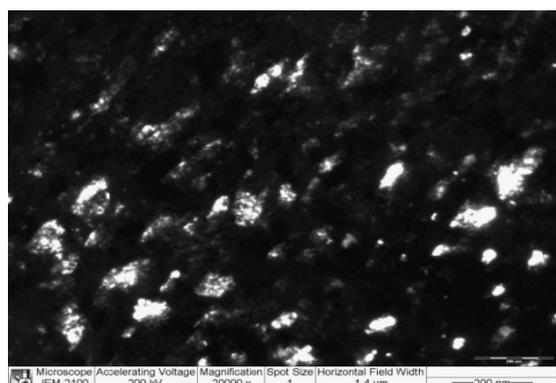


*б*

Рис. 4. Изображения первого слоя покрытия в ПЭМ: *a* – общий вид при увеличении  $\times 12000$ , *б* – при увеличении  $\times 80000$



*a*



*б*

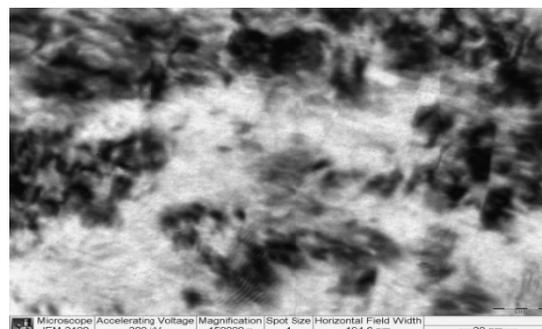
**Рис. 5.** ПЭМ изображения микроструктуры другого слоя покрытия: *a* – светлопольное, *б* – темнопольное

Изменение структуры наблюдали на других участках исследуемых покрытий. Здесь существенно усложняется дефектная и субзёрненная микроструктура покрытия (рис.5). На светлопольных изображениях наблюдается высокая плотность относительно узких полос экстинкции, также особенностью является их медленное перемещение в процессе наклона фольги в гониометре. При наклоне на темнопольных изображениях контуров экстинкции обнаруживается крапчатый окрас, который состоит из отдельных областей, которые или гаснут, или загораются. Данная особенность является результатом формирования разориентированных дефектных субструктур в прослойке нитрида титана с высокими локальными разориентировками [7]. Такой тип субструктуры подтверждается видом дифракционной картины (рис. 6).

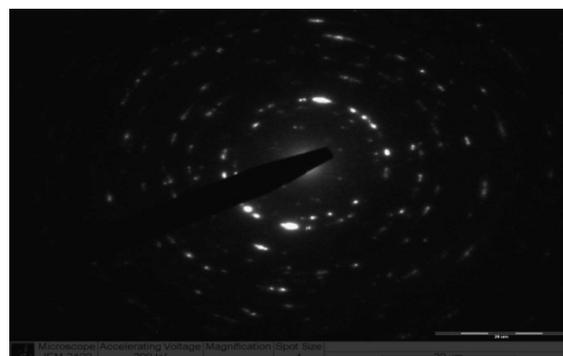
Полученные результаты электромикроскопических исследований дают прямые свидетельства многослойности полученных покрытий. Первый слой представляет собой тонкую прослойку нанокристаллического титана с размером зёрен 50–60 нм, но следующий слой является прослойкой нитрида титана с ультрамелкозернистым зерном и высокой кривизной кристаллической решётки. Такая необычная микро-

структура покрытия позволяет ожидать проявления его высоких эксплуатационных свойств, что будет исследовано в дальнейшей работе.

Также были исследованы изменения структуры лопатки по толщине пера. Для этой цели измеряли распределение микроструктуры на поперечном шлифе пера лопатки (рис.7).



*a*



*б*

**Рис. 6.** Микроструктура и дифракционная картина микроструктуры покрытия: *a* – ПЭМ изображение участка данного слоя, с которого снимали дифракционную картину; *б* – дифракционная картина с этого участка



**Рис. 7.** Перо лопатки с отмеченными точками измерения микротвердости

Установлено, что в лопатке без покрытия средняя величина  $H_v$  (по 8 измерениям) составила 400 единиц. В то же время после нанесения покрытия  $H_v$  составило 445 единиц, то есть несколько выше. Также повышение твердости можно связать с некоторым дополнительным легированием сплава вследствие нанесения покрытия и ионной имплантации.

Таким образом, впервые исследована в ПЭМ структура многослойного покрытия, нанесенного на лопатку, и установлено формирование нанокристаллического состояния в его отдельных

слоях. Показано, что нанесение покрытия, совмещенное с ионной имплантацией, оказывает также влияние на материал лопатки. Этот вопрос будет детально рассмотрен в дальнейших работах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение эрозионной стойкости рабочих лопаток компрессора ГТД / Н. В. Белан, В. В. Омельченко, А. Н. Прокопенко и др. // *Авиационная промышленность*. 1986. № 10. С. 19–20.
2. **Гецов Л. Б.** Материалы и прочность деталей газовых турбин. М.: Недра, 1996. 591 с.
3. **Сулима А. А., Евстигнеев М. И.** Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1974. 255 с.
4. **Верещака А. С.** Некоторые тенденции совершенствования технологической производственной среды // *СТИН*. 2005. № 9. С. 9–14.
5. **Валиев Р. З., Александров И. В.** Объемные наноструктурные металлические материалы получение, структура и свойства. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.
6. Исследование газоабразивного износа образцов из титанового сплава ВТ-6 с наноструктурированными защитными покрытиями / Ю. М. Дыбленко, К. С. Селиванов, Р. Р. Валиев, И. В. Скрябин // *Вестник УГАТУ*, 2011. Т.15, №1(41). С.83–86.
7. Нанокompозитные и наноструктурные сверхтвёрдые покрытия системы Ti-Si-B-N / А. Д. Коротаяев, Д. П. Борисов, В. Ю. Мошков, С. В. Овчинников, Ю. П. Пинжин, А. Н. Тюменцев // *Физическая мезомеханика*. 2005. №8. С.103–116.

#### ОБ АВТОРАХ

**Валиев Роман Русланович**, асп. каф. сопротивления материалов, мл. науч. сотр. НИИ ФПМ при ФГБОУ ВПО УГАТУ. Дипл. инженер по машинам и технологиям высокоэффективных процессов обработки (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. структуры и свойств наноструктурных покрытий.

**Дыбленко Юрий Михайлович**, нач. отдела СКТБ «Искра». Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1974). Канд. техн. наук по технологии машиностроения (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. разработки вакуумно-плазменных технологий высоких энергий и спец. устройств для обеспечения эксплуатац. свойств деталей, эксплуатируемых в экстремальных условиях.

**Ганеев Артур Вилевич**, асп. каф. нанотехнологии, инженер НИИ ФПМ при ФГБОУ ВПО УГАТУ. Дипл. инженер по материаловедению в машиностроении (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. структуры материалов методами электронной микроскопии.

**Жернаков Владимир Сергеевич**, засл. деятель науки РФ, проф., зав. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепл. двигателям ЛА (УГАТУ, 1992). Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.