

Ю. М. Дыбленко, К. С. Селиванов, Р. Р. Валиев, И. В. Скрыбин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ-6 С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Рассматривается возможность повышения стойкости к газоабразивному износу поверхности образцов из ультрамелкозернистого и крупнозернистого титанового сплава ВТ-6 путем нанесения защитных наноструктурированных покрытий, полученных электродуговым распылением катода многокомпонентного состава. *Газоабразивная эрозия; нанослойные покрытия; нанослойный титановый сплав; вакуумно-плазменные нанослойные покрытия*

### ВВЕДЕНИЕ

Действующие требования к повышению надежности и ресурса эксплуатации современных турбомашин обуславливают постоянное совершенствование и разработку новых способов обработки наиболее ответственных деталей двигателей, лопаток компрессора ГТД. Для их изготовления на базовом предприятии ОАО «УМПО» широко используют титановый сплав ВТ-6. При эксплуатации двигателей в составе наземных установок (например, ГПА на основе ГТД АЛ-31СТ) поверхность лопаток компрессора двигателя постоянно подвержена воздействию газоабразивного потока. В результате этого материал лопатки претерпевает эрозийный износ, возникают различные абразивные повреждения, вызванные присутствием в газе твердых частиц.

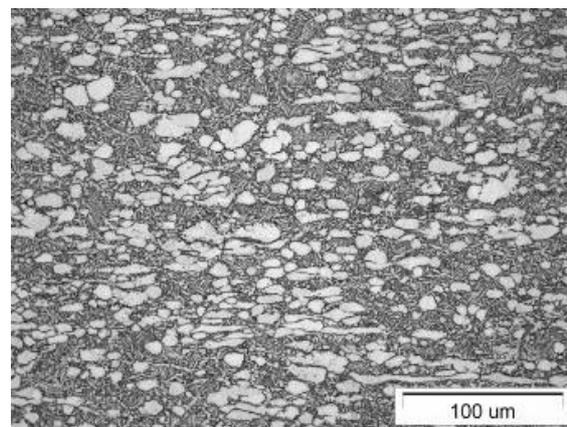
Одним из наиболее перспективных методов повышения ресурса и надежности лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов является ионно-имплантационная и вакуумно-плазменная обработка [1, 2].

Для упрочнения лопаток компрессора ГТД в УГАТУ под руководством проф. А. М. Смыслова разработано несколько способов нанесения многослойных вакуумно-плазменных покрытий на основе нитридов тугоплавких металлов [6].

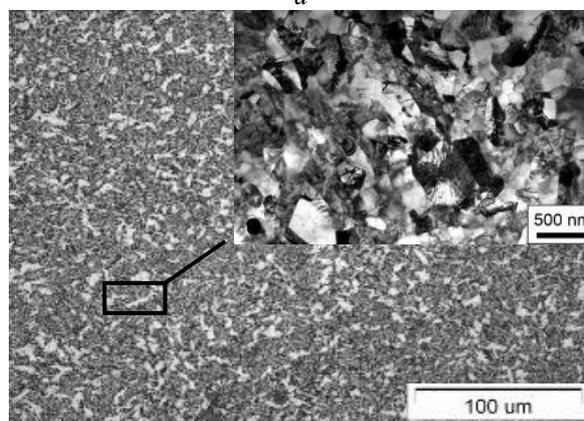
Дальнейшее совершенствование процесса упрочнения лопаток может быть связано с повышением уровня механических свойств основного материала, например измельчением микроструктуры интенсивной пластической деформацией (ИПД) [3]. В настоящей работе исследовали возможность повышения стойкости к газоабразивному изнашиванию образцов из ультрамелкозернистого и крупнозернистого титанового сплава ВТ-6 путем нанесения защитных наноструктурированных покрытий, полученных электродуговым распылением катода многокомпонентного состава.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изготовления образцов был использован промышленный титановый сплав ВТ6 (Ti – основа, Al – 6,6%; V – 4,9%; Zr – 0,02%; Si – 0,033%; Fe – 0,18%; C – 0,007%; O<sub>2</sub> – 0,17%; N<sub>2</sub> – 0,01%; H<sub>2</sub> – 0,002%). Для изготовления исследуемых образцов был использован сплав в исходном, крупнозернистом (с размером зерна  $d = 30$  мкм) и ультрамелкозернистом (с размером зерна  $d = 0,3$  мкм) состояниях.



а



б

Рис. 1. Структура сплава ВТ-6 в различных состояниях: а – крупнозернистое (КЗ); б – ультрамелкозернистое (УМЗ)

Для создания ультрамелкозернистой структуры (УМЗ) был применен метод интенсивной пластической деформации (ИПД) путем равноканального углового прессования [3]. Для УМЗ структур, полученных методом ИПД, характерно присутствие высоких плотностей решеточных и зернограничных дислокаций, которые создают поля дальнедействующих упругих напряжений, что приводит к повышению прочности материала. Из полученных заготовок изготавливали образцы в виде пластин размером 20x15x4 мм с допусками на размеры по 7 классу точности и шероховатостью рабочей поверхности 0,16..0,32 Ra.

Различные варианты многослойных вакуумно-плазменных покрытий были получены с помощью двух электродуговых испарителей со сменными катодами из титанового сплава ВТ-1-0 (Ti) и многокомпонентного сплава TiAlZrMoV ( $\eta$ Ti). Архитектуру покрытий (рис. 2) формировали путем чередования времени нанесения каждого отдельного слоя и количества напыляемого материала с каждого катода [4]. Ионно-плазменная модификация образцов ионами азота осуществлялась газовым плазмодогенератором «ПИНК». Напыление покрытий проводилось в условиях ионного ассистирования.

При формировании многослойных покрытий на образцах с различной исходной структурой (КЗ и УМЗ) использовали следующие варианты многослойных покрытий:

Вариант №1:

- а) Подслой Ti – 5 мкм (40 раз)
- б) (Ti+  $\eta$ Ti)N – 4 минут (40 раз),
- в) (Ti+  $\eta$ Ti) – 1 минута (40 раз),
- г) Завершающий слой (Ti+  $\eta$ Ti)N – 10 мин.

Вариант №2

- а) Подслой Ti – 5 мкм
- б) (Ti+  $\eta$ Ti)N – 1 минута (90 раз),
- в) (Ti+  $\eta$ Ti) – 10 секунд (90 раз),
- г) Завершающий слой (Ti+  $\eta$ Ti)N – 10 мин.

Сформированные покрытия отличались количеством слоев и режимами нанесения. Общая толщина покрытий составила  $15 \pm 2$  мкм, промежуточных слоев – от 10 до 50 нм.

После упрочняющей обработки образцы были переданы на испытания износостойкости при газоабразивном воздействии в потоке твердых частиц. Испытания были проведены на установке Д7691-847 совместно с Казанским МПО по методике ЦИАМ №9900 [5].

Метод газоабразивного изнашивания основан на одновременном воздействии на испытуемые образцы потока твердых частиц, создаваемого центробежным ускорителем при фиксированных режимах испытаний. Центробежный ускоритель твердых частиц содержал вращающийся вокруг вертикальной оси ротор с четырьмя радиально расположенными каналами прямоугольного сечения. В радиальные каналы ротора из бункера поступал абразивный материал, который под действием центробежных сил выбрасывался из ротора и ударялся о поверхность закрепленных вокруг него испытуе-

мых образцов. В качестве абразивного материала использовали электрокорунд марки 25А М63Н ГОСТ 28818-90 (размер частиц 50-63 мкм).

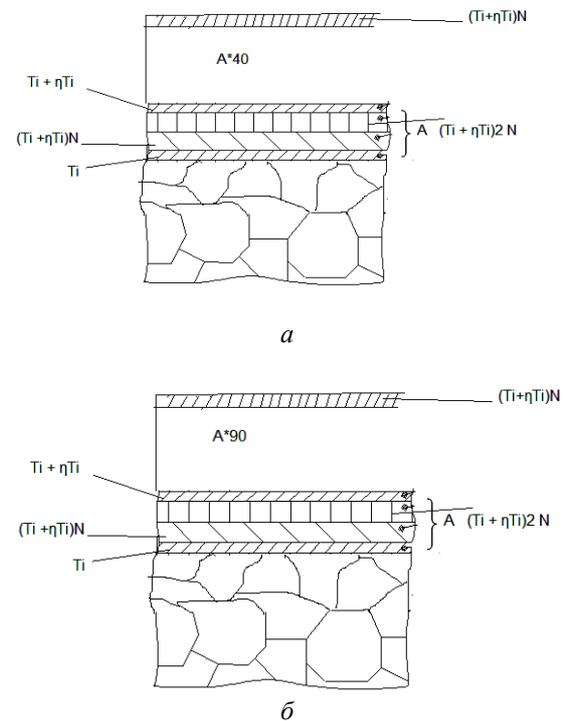


Рис. 2. Схемы испытываемых многослойных покрытий Ti-TiN: а – вариант № 1, б – вариант № 2

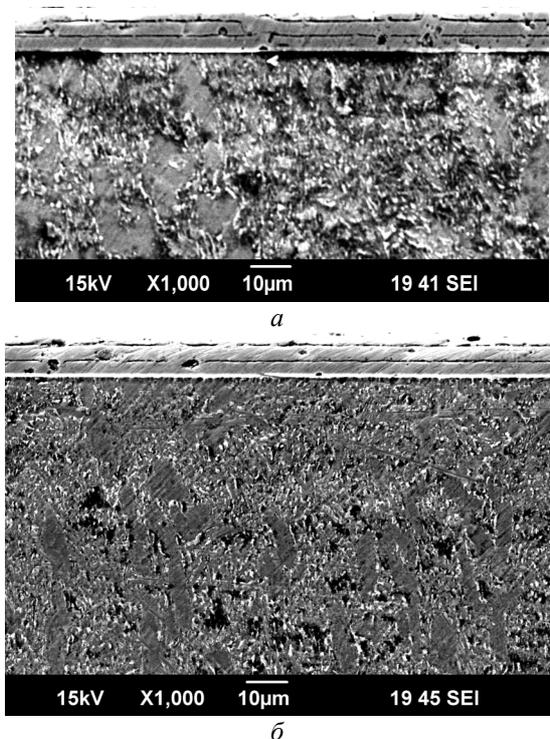


Рис. 3. Микроструктура образцов из сплава ВТ6 с многослойным покрытием системы Ti-TiN: а – КЗ структура, б – УМЗ структура

## Результаты исследования газоабразивного износа стойкости образцов из сплава ВТ-6

№ образца	Вариант обработки	Начальная масса, г	Масса образца после испытания, г	Величина износа $\Delta m/m_0$ , %	Относительная эрозионная стойкость
1	КЗ-структура, без покрытия (исходное состояние)	4,4517	4,4163	0,1127	1
2	КЗ-структура, покрытие вариант №1	4,4722	4,4682	0,0706	1,6
3	КЗ-структура, покрытие вариант №2	4,4798	4,4769	0,0545	2,1
4	УМЗ-структура, без покрытия	5,5958	5,5932	0,0453	2,5
5	УМЗ-структура, покрытие вариант №1	5,6866	5,6851	0,0285	3,9
6	УМЗ-структура, покрытие вариант №2	5,4339	5,4317	0,0357	3,1

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

После испытания износ материала определяли по изменению массы образцов и сравнению полученной величины с износом исходного образца (сплав ВТ-6 с КЗ структурой, без покрытия). В таблице представлены результаты взвешивания образцов и рассчитанные величины износа.

Величину износа рассчитывали по формуле:

$$\zeta = \Delta m / m_0 * 100\%,$$

где  $\Delta m$  – изменение массы образца в результате испытания;  $m_0$  – начальная масса образца.

За стойкость к газоабразивному изнашиванию принимали отношение величины износа исследуемого образца к износу образца в исходном состоянии. Результаты эксперимента показывают значительное (более чем в 1,5–2,0 раза) повышение стойкости к газоабразивному изнашиванию образцов с защитными многослойными вакуумно-плазменными покрытиями Ti-TiN по сравнению с образцами без покрытий. Это относится в равной степени к образцам из сплава ВТ-6 с КЗ структурой и с УМЗ структурой. Наблюдаемое повышение износостойкости образцов с УМЗ структурой авторы связывают, в первую очередь, с повышением их механических свойств [3].

Нанесение защитных многослойных вакуумно-плазменных покрытий Ti-TiN по предлагаемому вариантам не оказывает заметного влияния на изменение УМЗ структуры сплава ВТ-6 (рис. 1, 3) и ее свойства. Последний вывод открывает возможность разработки комбинированных технологий, совмещающих методы ИПД и последующего нанесения защитных вакуумно-плазменных покрытий с целью обеспечения эксплуатационных свойств деталей ГТД.

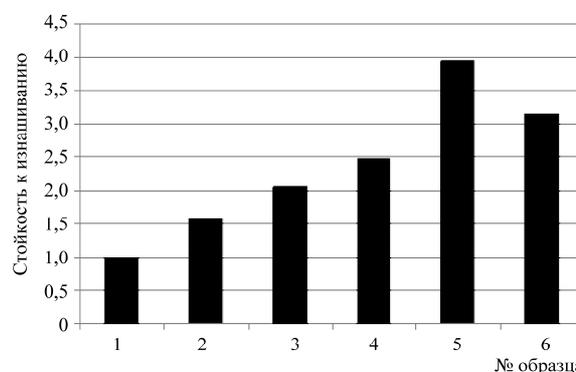


Рис. 3 Относительная стойкость к газоабразивному износу исследуемых образцов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение стойкости при газоабразивном изнашивании поверхности деталей ГТД из титанового сплава ВТ-6 может быть обеспечено путем формирования ультрамелкозернистой структуры основного материала с последующим нанесением защитных наноструктурированных многослойных покрытий системы Ti-TiN.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физико-механические и коррозионные свойства ионно-плазменных покрытий нитрида титана, полученных при разных парциальных давлениях реакционного газа / Ю. П. Тарасенко [и др.] // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 4. С. 42–45.
2. Смыслов А. М., Дыбленко Ю. М., Смыслова М. К. Исследование влияния параметров комплексной ионно-плазменной обработки на физико-химические и эксплуатационные свойства упрочняемых титановых сплавов // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов: Всерос. Науч.-практ. конф. Уфа, 2001. С. 241–243.

3. **Валиев Р. З., Александров И. В.** Объемные наноструктурные металлические материалы получение, структура и свойства. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.

4. **Белый А. В., Карпенко Г. Д., Мышкин Н. К.** Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. М.: Машиностроение, 1991. 208 с.

5. Технический отчет ЦИАМ №9900

6. Способ обработки лопаток турбомашин / А. М. Смыслов [и др.]. Патент РФ на изобретение, ФИПС, 2009.

## ОБ АВТОРАХ

**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 экстремальн. условиях.

**Селиванов Константин Сергеевич**, доц., ст. науч. сотр. НИЧ каф. технологии машиностроения. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по технологии машиностроения (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. физ.-хим., структурно-фазового состояния и эксплуатац. свойств поверхности детали после ее ионно-имплантац., вакуумно-плазмен. модифицирования.

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

**Скрябин Илья Викторович**, асп. каф. нанотехнологий, инженер НИИ ФПМ при ГОУ ВПО УГАТУ. Дипл. инженер-физик по физике металлов (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. использования наноструктурн. титановых сплавов для изготовления изделий сложной формы, работающих в условиях повышенных температур и напряжений.