

УДК 621.79

А. Н. РАМАЗАНОВ, П. В. БЕГЛИКЧЕЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО КАТОДА СОСТАВА Ti-AL-ZR-MO

Рассматривается возможность повышения несущей способности поверхности лопаток компрессора современного ГТД за счет применения вакуумного ионно-плазменного покрытия сложного элементного состава. Исследуется морфология и структура покрытия, полученного распылением катода многокомпонентного состава. Определяются механические характеристики предлагаемого покрытия. *Ионное модифицирование; многокомпонентный катод; покрытие*

В настоящее время резко возрастают требования к уровню и стабильности эксплуатационных свойств лопаток турбомашин. Поверхность лопаток компрессора газотурбинного двигателя в процессе эксплуатации подвержена воздействию газообразного потока при температуре 100–550°C. Лопатки паровых турбин также подвержены абразивному износу, вызванному постоянным присутствием в перегретом паре абразивных твердых частиц. Вследствие чего основными видами повреждений этих деталей являются коррозийный и эрозийный износ [1].

Задача повышения стойкости рабочей поверхности лопаток турбомашин решается за счет применения различных технологических схем их обработки, наиболее перспективной из которых является ионно-имплантационная модификация поверхности с последующим нанесением вакуумного ионно-плазменного покрытия. На сегодняшний день широко известны покрытия на основе нитридов и карбидов титана, циркония, хрома [1–5], что обусловлено, прежде всего, уникальным набором физико-химических характеристик этих соединений [6].

Целью данной работы является разработка и исследование морфологии, структуры и фазового состава вакуумного ионно-плазменного покрытия, полученного электродуговым распылением многокомпонентного катода состава Ti-Al-Zr-Mo.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве оборудования для ионно-имплантационного модифицирования с последующим нанесением вакуумного ионно-плазменного покрытия использовалась модер-

низированная установка ВУ-1БС, оснащенная аксиально-симметричным электродуговым испарителем.

Ионная очистка поверхности образца от загрязнений осуществлялась в тлеющем разряде при давлении $P = 5 \times 10^{-2}$ Па и потенциале смещения $U_{см} = 1 \times 10^3$ В. Затем в вакуумную камеру подавался азот до $P = 5,5 \div 6 \times 10^0$ Па и производилась активация поверхности исследуемых образцов.

Процесс напыления включал три этапа: подготовительный, нанесение подслоя, осаждение покрытия. Подготовительный этап заключался в очистке и одновременном нагреве ионами многокомпонентной мишени поверхности образца в среде аргона, при этом температура образца не превышала 450°C. Затем на поверхность образца наносили подслоя с целью улучшения адгезии покрытия к подложке. На этапе осаждения покрытия в камеру подавался реакционный газ азот до $P = 3 \div 5 \times 10^{-1}$ Па. Напыление вели до достижения толщины покрытия ≈ 10 мкм.

В качестве подложки использовался цилиндрический образец из стали 20Х13 (рис. 1). Перед нанесением покрытия поверхность образца подвергалась электролитно-плазменному полированию (ЭПП). ЭПП обеспечивает снижение параметра шероховатости Ra с 0,63 до 0,03–0,05 мкм, при значительном сокращении трудоемкости подготовки к напылению [7].

Морфология поверхности образца с покрытием исследовалась на оптическом металлографическом микроскопе Olympus GX-71 и растровом электронном микроскопе Philips SEM 515.

Полуколичественный элементный анализ покрытия проводился на микроанализаторе EDAX ECON IV с пространственным разрешением $1,0 \times 1,0 \times 5,0$ мкм.

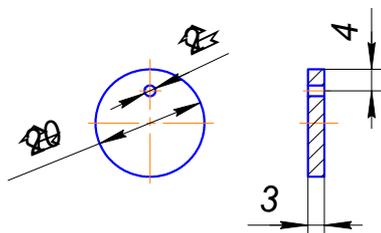


Рис. 1. Эскиз образца из стали 20X13

Микрогеометрия покрытия исследовалась на профилометре 296 (А-703) с компьютерной приставкой «Сигма-тест», отвечающим требованиям ГОСТ 19300-86 на измерение параметров шероховатости. Измерение параметров шероховатости покрытия проводилось в двух взаимно перпендикулярных направлениях на длине трассы 1,5 мм при отсечке шага 0,25 мм в соответствии с ГОСТ 2789-85.

Твердость и модуль упругости покрытия определялись при наноиндентировании образца, путем вдавливания индентора с алмазным наконечником в приповерхностный слой. Обработка данных осуществлялась с помощью программного обеспечения нанотвердомера Nano Hardness Tester фирмы CSEM. Измерения нанотвердости образца с покрытием проводилось при нагрузке 300 мН, при этом глубина проникновения индентора во всех случаях не превышала 1200 нм. Обработка экспериментальных данных осуществлялась по результатам измерений не менее 3 отпечатков, полученных при одинаковых условиях эксперимента. Твердость определялась максимальной нагрузкой P_{\max} , разделенной на проецируемую площадь контакта после разгрузки:

$$H = \frac{P_{\max}}{A_{PC}} \quad (1)$$

Твердость по Виккерсу определялась максимальной нагрузкой P_{\max} , разделенной на площадь контакта после разгрузки:

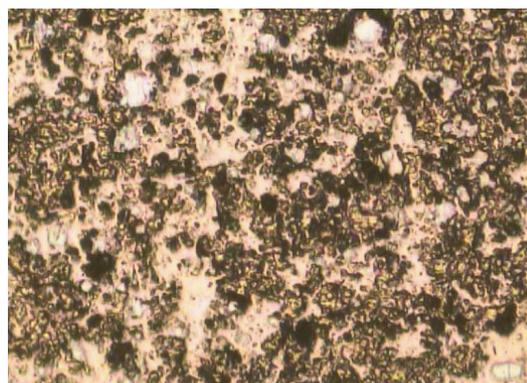
$$H_v = \frac{P_{\max}}{A_c * 9,81} \quad (2)$$

Фазовый состав и структура покрытия исследовались методами рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 с компьютерным управлением и записью

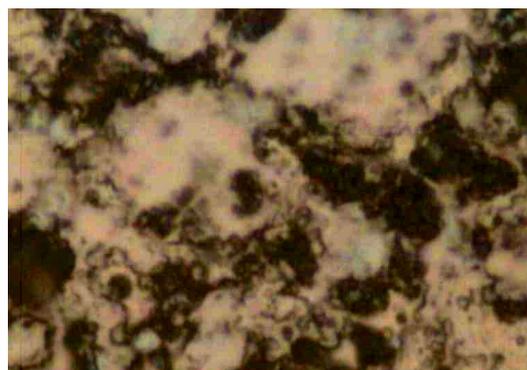
спектров. Для исключения влияния структуры и фазового состава подложки на получаемые в процессе съемки результаты, использовался метод скользящего пучка, при котором на образец с покрытием под малым углом α падает монохроматический рентгеновский пучок, что позволяет проводить анализ в тонких приповерхностных слоях. Съемка проводилась в $\text{Cu } K\alpha$ — излучении с постоянным углом входа $\alpha = 5^\circ$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оптическое изображение поверхности образца представлено на рис. 2. Из рисунка видно, что на поверхности покрытия имеются светлые и темные участки, что может быть связано с их различным элементным и фазовым составом.



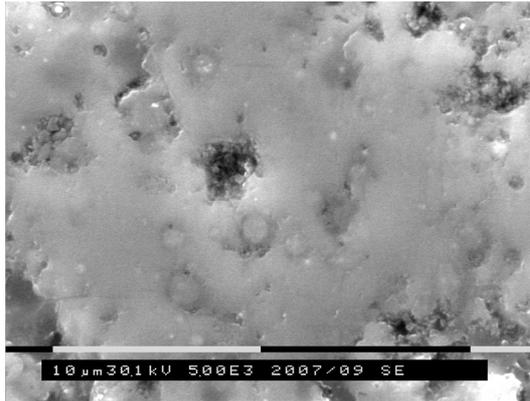
а



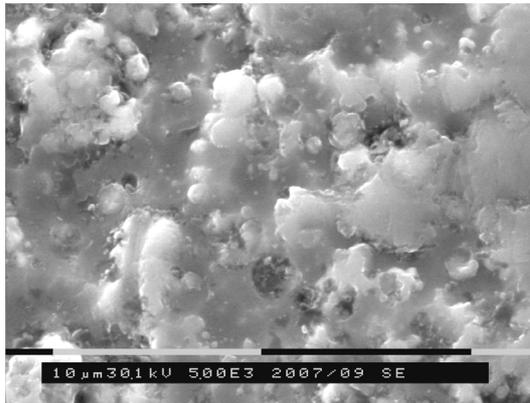
б

Рис. 2. Вид поверхности образца с покрытием при увеличении $\times 200$ (а) и $\times 1000$ (б)

Дальнейшее исследование этих участков методом сканирующей электронной микроскопии показало, что светлые участки покрытия (рис. 3, а) имеют более однородную и плотную структуру, по сравнению с темными (рис. 3, б).



a



б

Рис. 3. РЭМ изображение светлого (а) и темного (б) участков покрытия

Результаты полуколичественного элементного анализа покрытия представлены в табл. 1.

Таблица 1

Элементный состав покрытия

Участок покрытия	Элемент	Содержание элемента, %
Светлый	Al	7,03
	Ti	87,74
	Zr	1,34
	Mo	3,90
Темный	Al	0,87
	Ti	97,87
	Zr	0,98
	Mo	0,28

Из данных табл. 1 следует, что содержание элементов Al, Zr, Mo в темных участках покрытия не превышает сотых долей процента, поэтому можно предположить, что эти участки образованы в основном соединением TiN. Светлые участки покрытия имеют более сложный состав, и характеризуются присутствием небольшого количества молибдена (3,9%) и повышенным, по сравнению с

темными участками, содержанием алюминия (7,03%).

Для исследования внутренней микроструктуры, а также характера границы «подложка-покрытие» был изготовлен поперечный шлиф образца, при исследовании которого было установлено, что покрытие (рис. 4) не имеет столбчатого строения, расслоений по толщине и отслоений по границе «подложка-покрытие».

Изучение структурно-фазового состояния поверхностного слоя образца выявило наличие в покрытии трех основных фаз: TiN, TiAlN₂ и AlN. Фазы, образованные соединениями Zr и Mo выявлены не были. Это может быть объяснено имеющимися ограничениями метода рентгеноструктурного анализа, ограничениями используемого для анализа оборудования и программного обеспечения или незначительным содержанием этих фаз в покрытии. Расчет картины дифракции (рис. 5) показал, что объемная доля фаз TiN, TiAlN₂, AlN в покрытии составляет 47,35, 50,45 и 2,20% соответственно. Параметры фаз приведены в табл. 2.

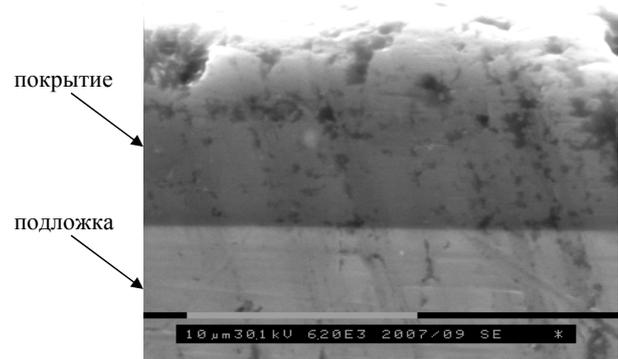


Рис. 4. РЭМ изображение поперечного шлифа образца с покрытием

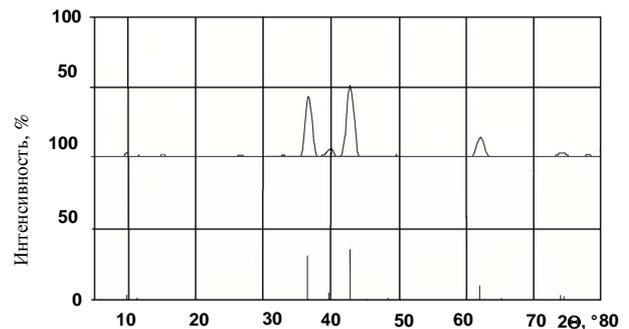


Рис. 5. Дифрактограмма покрытия

Таблица 2

Параметры фаз покрытия

Фаза	Межплоскостное расстояние	Область когерентного рассеяния, нм
TiN	4,2565	17
TiAlN ₂	4,2018	27
AlN	4,3238	15,5

Профилограммы, снятые с поверхности образца при исследовании микрогеометрии покрытия, представлены на рис. 6.

Из профилограмм видно, что характер распределения неровностей покрытия равномерный и не зависит от выбранного направления, максимальная глубина неровностей 2 мкм. Параметры шероховатости покрытия приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений параметров шероховатости покрытия

Направление	Параметр	Значение, мкм
А	Ra	0,386
	Rz	1,960
Б	Ra	0,373
	Rz	1,683

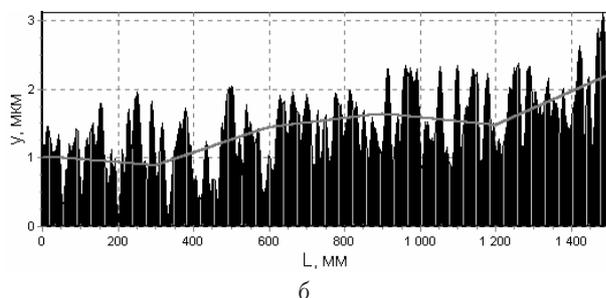
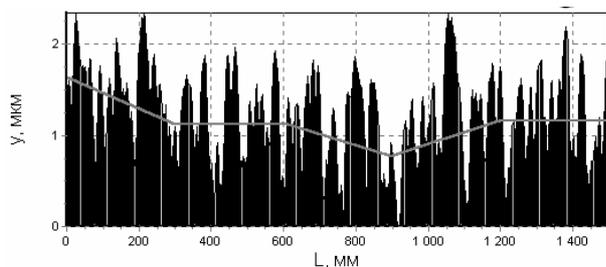


Рис. 6. Профилограммы поверхности образца с покрытием в направлении А (а) и Б (б)

Кривые нагрузки-разгрузки, отображающие процесс индентации образца с покрытием, приведены на рис. 7.

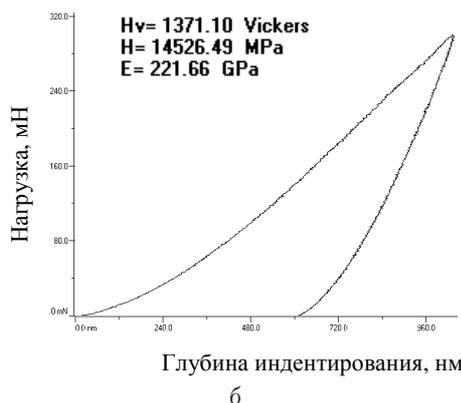
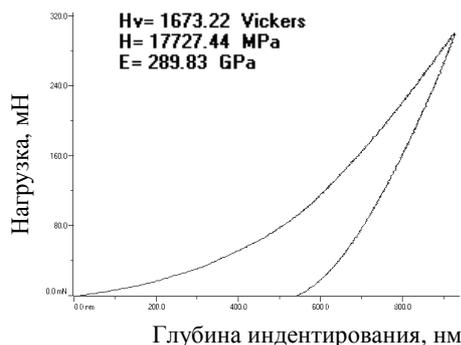


Рис. 7. Результаты наноиндентирования покрытия в темных (а) и светлых (б) участках

ВЫВОДЫ

Формируемое при осаждении из многокомпонентной плазмы состава Ti-Al-Zr-Mo-N вакуумное ионно-плазменное покрытие имеет светлые и темные участки, отличающиеся как по элементному, так и по фазовому составу. Светлые участки покрытия образованы в основном фазой TiAlN₂, а темные — TiN. Содержание фаз TiN и TiAlN₂ по результатам рентгеноструктурного анализа приблизительно одинаково и составляет 97,8% объема покрытия, оставшиеся 2,2% занимает фаза AlN. Однако проведенный полуколичественный элементный анализ позволяет предположить, что в покрытии присутствуют фазы, образованные соединениями Zr и Mo, причем содержание этих фаз в светлых участках покрытия больше, чем в темных.

Твердость темных участков на 18%, а модуль упругости на 23% больше аналогичных показателей для светлых участков покрытия, что свидетельствует об их меньшей пластичности.

Шероховатость поверхности образца после нанесения покрытия соответствует 9-му классу чистоты (Ra от 0,32 до 0,63 мкм) по ГОСТ 2789-85. Значение параметров микрогеометрии покрытия не зависит от выбранного направления измерения. Снижение

класса чистоты поверхности образца после нанесения покрытия связано с особенностями формирования вакуумного ионно-плазменного покрытия и присутствием капельной фазы в плазменном потоке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасенко, Ю. П.** Физико-механические и коррозионные свойства ионно-плазменных покрытий нитрида титана, полученных при разных парциальных давлениях реакционного газа / Ю. П. Тарасенко, И. Н. Царева [и др.] // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 4. С. 42–45.
2. **Крысина, О. В.** Электродуговое плазменно-ассистированное формирование нанокристаллических покрытий типа TiN / О. В. Крысина, К. А. Кошкин // Физика и химия наноматериалов : сб. матер. Междунар. шк.-конф. молодых ученых. Томск : Томск. гос. ун-т. 2005. С. 637–639.
3. **Каменева, А. Л.** Использование тонкопленочных покрытий на основе ZrN, Ti-Zr-N, Ti-Zr-ON и Ti-B-Si-N для упрочнения инструмента из P6M5, применяемого при обработке нержавеющей стали / А. Л. Каменева, Е. М. Трофимов [и др.] // Перспективные материалы. 2006. № 6. С. 80–86.
4. **Григорьев, С. Н.** Модификация поверхности режущего инструмента из быстрорежущей стали путем вакуумно-плазменной обработки / С. Н. Григорьев, М. А. Волосова [и др.] // Физика и химия обработки материалов. 2005. № 5. С. 11–18.
5. **Коротаев, А. Д.** Структурно-фазовое состояние нанокристаллических покрытий нитридов металлов / А. Д. Коротаев, А. Н. Тюменцев // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 6. С. 32–40.
6. **Ивановский, А. Л.** Электронное строение тугоплавких карбидов и нитридов переходных металлов / А. Л. Ивановский, В. П. Жуков, Б. А. Губанов. М. : Наука, 1990. 224 с.
7. **Таминдаров, Д. Р.** Особенности способа электролитно-плазменной подготовки поверхности перед напылением / Д. Р. Таминдаров, А. В. Рева, А. Н. Рамазанов // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки : матер. 8-й Междунар. практ. конф. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. С. 56–60.

ОБ АВТОРАХ



Рамазанов Альберт Нуруллаевич, асп. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-мех. по маш. и технол. высокоэфф. процессов обработки (УГАТУ, 2004). Готовит дис. в обл. технол. и оборуд. вакуумной ионно-плазменной обр-ки материалов.



Бегликчиев Павел Васильевич, асп. той же каф. Дипл. инж.-мех. по реновации средств матер. пр-ва (УГАТУ, 2003). Готовит дис. в обл. технол. и оборуд. вакуумной ионно-плазменной обр-ки материалов.