

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ, СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ПОКРЫТИЯ 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.*

**Ключевые слова:** ионное модифицирование, многокомпонентный катод, вакуум, покрытие, многокомпонентный состав, распыление, микроструктура, тлеющий разряд.

### Введение

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

### Состояние исследований и актуальность работы

В качестве оборудования для ионно-имплантационного модифицирования с последующим нанесением вакуумного ионно-плазменного покрытия использовалась модернизированная установка ВУП-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  $P = (3 \dots 5) \times 10^{-1}$  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 °С. Затем на поверхность образца наносили подслоя с целью улучшения адгезии покрытия к подложке. На этапе осаждения покрытия в камеру подавался реакционный газ азот до  $P = (3 \dots 5) \times 10^{-1}$  Па. Напыление вели до достижения «толщины покрытия» 10 мкм. В качестве подложки использовался цилиндрический образец из стали 20X13 (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].

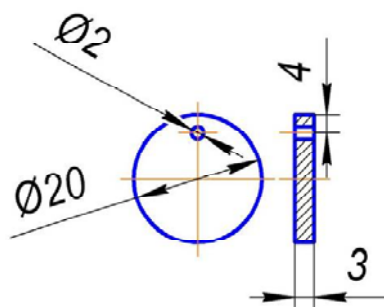


Рис. 1. Эскиз образца из стали 20X13

Морфологія поверхні образця з покриттям досліджувалась на оптичному металлографічному мікроскопі Olympus GX-71 і растровому електронному мікроскопі Philips SEM 515.

Кількісний елементний аналіз покриття проводився на мікроаналізаторі EDAX ECON IV з просторовим розрешенням  $1,0 \times 1,0 \times 5,0$  мкм.

Мікрогеометрія покриття досліджувалась на профілометрі 296 (A-703) з комп'ютерною приставкою «Сигма-тест», відповідаючим вимогам ГОСТ 19300-86 на вимірювання параметрів шорховатості. Вимірювання параметрів шорховатості покриття проводилось в двох взаємно перпендикулярних напрямках на довжині траси 1,5 мм при отсечке шага 0,25 мм в відповідності з ГОСТ 2789-85.

Твердість і модуль упругості покриття визначались при наноіндентуванні образця, шляхом вдавлювання індентора з алмазним наконечником в приповерхневий шар. Обробка даних здійснювалась з допомогою програмного забезпечення нанотвердоміра Nano Hardness Tester фірми CSEM. Вимірювання нанотвердості образця з покриттям проводилось при навантаженні 300 мН, при цьому глибина проникнення індентора в усіх випадках не перевищала 1200 нм. Обробка експериментальних даних здійснювалась по результатам вимірювань не менше 3 отпечатків, отриманих при однакових умовах експерименту. Твердість визначалась максимальною навантаженням, розділеною на проєцируему площу контакту після розвантаження (формула 1) [8]:

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

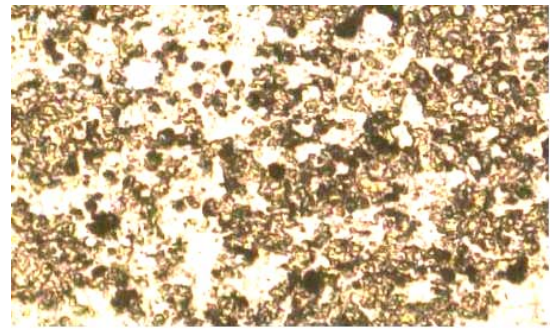
Твердість по Віккерсу [8] визначалась максимальною навантаженням  $P_{\max}$ , розділеною на площу контакту після розвантаження:

$$H_v = 1,854 \frac{P}{d^2} \quad (2)$$

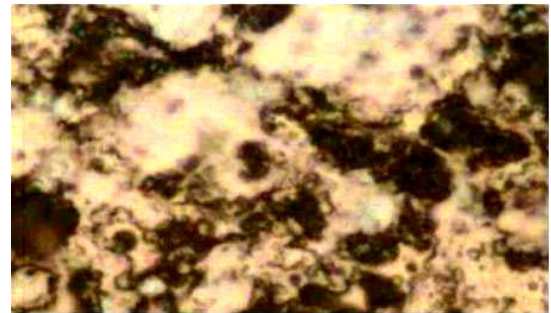
Фазовий склад і структура покриття досліджувались методами рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі Shimadzu XRD-6000 з комп'ютерним управлінням і записом спектрів. Для виключення впливу структури і фазового складу підложки на отримуваних в процесі зйомки результати використовувался метод скользящего пучка, при якому на зразок з покриттям під малим кутом  $\alpha$  падає монохроматичний рентгеновський пучок, що дозволяє проводити аналіз в тонких приповерхневих шарах. Зйомка проводилась з використанням  $Cu K_a$  випромінювання з постійним кутом входу  $\alpha = 5^\circ$ .

### Результати експерименту і їх обговорення

Оптичне зображення поверхні образця представлено на рис. 2. З рисунка видно, що на поверхні покриття існують світлі і темні ділянки, що може бути пов'язано з їх різним елементним і фазовим складом.

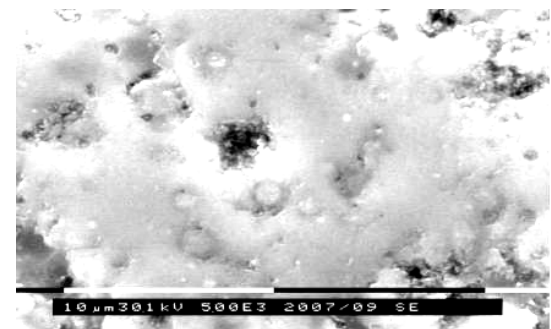


а

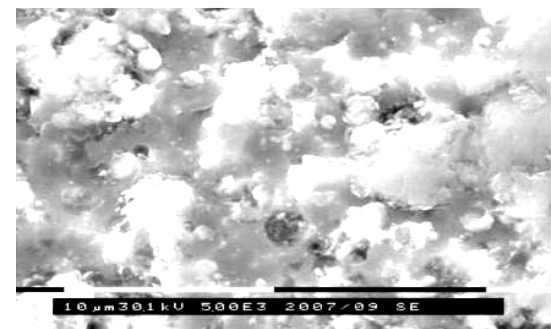


б

Рис. 2. Мікроструктура образця з покриттям при збільшенні  $\times 200$  (а) і  $\times 1000$  (б)



а



б

Рис. 3. РЕМ зображення світлого (а) і темного (б) ділянок покриття,  $\times 1500$

Дальніше дослідження цих ділянок методом скануючої електронної мікроскопії показало, що світлі ділянки покриття (рис. 3, а) мають більш однорідну і щільну структуру, порівняно з темними (рис. 3, б) ділянками, з вмістом алюмінію (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».

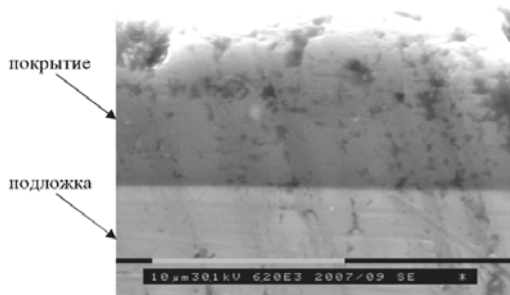


Рис. 4. РЭМ- изображение поперечного шлифа образца с покрытием,  $\times 1200$

Изучение структурно-фазового состояния поверхностного слоя образца выявило наличие в покрытии трех основных фаз: TiN, TiAlN<sub>2</sub> 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. Параметры фаз приведены в табл. 1.

Результаты элементного анализа покрытия представлены в табл. 2.

Таблица 1 – Параметры фаз покрытия

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

Таблица 2 – 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. 2 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 %).

Расчет картины дифракции (рис. 5) показал, что объемная доля фаз TiN, TiAlN<sub>2</sub> и AlN в покрытии составляет 47,35, 50,45 и 2,20 % соответственно.

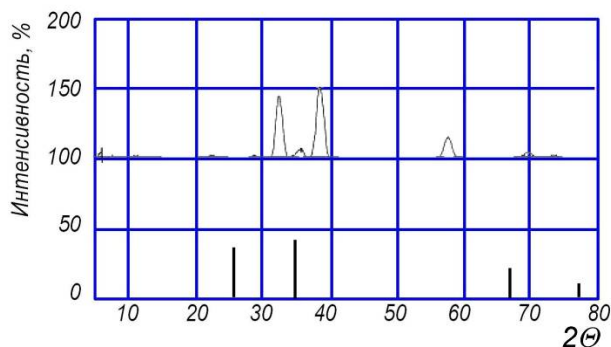


Рис. 5. Дифрактограмма покрытия

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

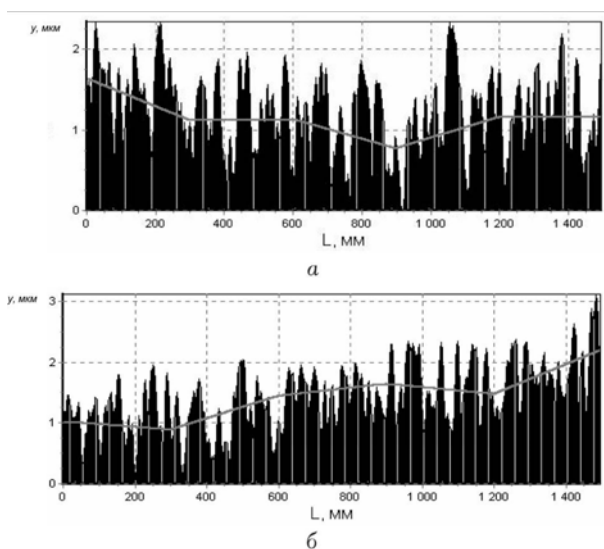


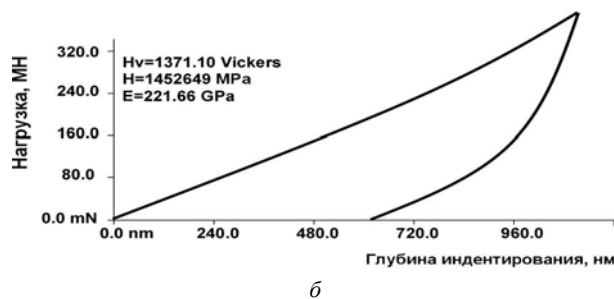
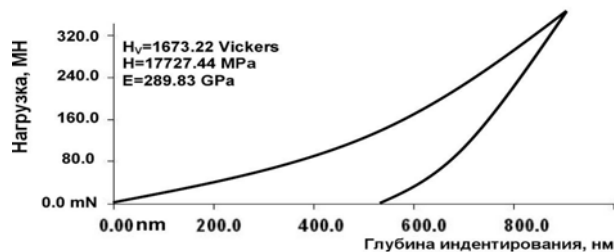
Рис. 6. Профилограммы поверхности образца с покрытием в направлении А (а) и Б (б)

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.

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

**Таблиця 3** – Результати измерений параметров шероховатости покриття

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



**Рис. 7.** Результати нанопроїндентування покриття в темних (а) і світлих (б) частках

### Выводы

1. 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. Содержание фаз по результатам рентгеноструктурного анализа приблизительно одинаково и составляет 97,8 % объема покрытия, оставшиеся 2,2 % занимает фаза AlN. Однако проведенный элементный анализ позволяет предположить, что в покрытиях

присутствуют фазы, образованные соединениями Zr и Mo, причем содержание этих фаз в светлых участках покрытия больше, чем в темных.

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

3. Шероховатость поверхности образца после нанесения покрытия соответствует 9-му классу чистоты ( $R_a$  от 0,32 до 0,63 мкм) по ГОСТ 2789-85. 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. Новые конструкционные металлические материалы, технологии их производства и обработки // Тезисы докладов XXIII сессии научного совета. – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 2009. – 150 с.
2. Борисов Ю. С. Плазменные порошковые покрытия / Борисов Ю. С., Борисова А. Л. – К. : Техника, 1986. – 222 с.
3. Белашенко В. Е. Влияние параметров процессов газотермического напыления на прочность покрытий / Белашенко В. Е., Заикин В. Н. // Свароч. пр.-во. – 2008. – № 10. – С. 31–33.
4. Сидоренко С. И. Материаловедческие основы инженерии поверхности / Сидоренко С. И., Пашенко В. Н., Кузнецов В. Д. – К. : Наук. думка, 2001. – 230 с.
5. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / [Ильющенко А. Ф., Кундас С. П., Достанко А. П. и др.]. – Минск : Научный центр исследований политики и бизнеса «Ариита - Маркетинг, Менеджмент», 1999. – 544 с.
6. Chaker P.R., Bull S.J., Rickerby D.S. A review of the methods for the evaluation of coating-substrate adhesion // Protective coatings. – 2013. – № 1–2. – P. 583–592.
7. Хасуй А. / Хасуй А., Моригаки О. – Наплавка и напыление : пер. с япон. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с.
8. <http://delta-grup.ru/bibliot/3k/5-6.htm>

Одержано 24.04.2015

### Пономаренко А.М., Губар Є.Я., І.І. Фенько, Васильченко В.Ю. Дослідження морфології, структури і фазового складу багатоконпонентного покриття складу Ti-Al-Zr-Mo

*Розглядається можливість підвищення несучої здатності поверхні лопаток компресора сучасного ГТД за рахунок застосування вакуумного іонно-плазмового покриття складного елементного складу. Досліджується морфологія і структура покриття, отриманого розпиленням катода багатоконпонентного складу. Визначаються механічні характеристики пропонованого покриття.*

**Ключові слова:** іонне модифікування, багатоконпонентний катод, вакуум, покриття, багатоконпонентний склад, розпилення, мікроструктура, тліючий розряд.

### Ponomarenko A., Gubar Ye., Fenko I., Vasilchenko V. Study of the morphology, structure and phase composition of a multicomponent coating was Ti-Al-Zr-Mo

*The possibility of increasing the carrying capacity of the surface of the compressor blades of modern turbine engine through the use of vacuum ion-plasma coating of complex elemental composition is studied. We study the morphology and structure of the coating produced by cathode sputtering a multi-component composition. Mechanical characteristics of the proposed coating are determined.*

**Key words:** ionic modification, multi-cathode, vacuum coating, multi-component composition, sputtering, microstructure, glow discharge.