

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НИТРИДА ТИТАНА ДЛЯ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ГТД

© 2012 Ю. П. Тарасенко<sup>1</sup>, И. Н. Царева<sup>1</sup>, Е. П. Кочеров<sup>2</sup>, Л. М. Вязовская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский филиал Института машиноведения имени А.А. Благонравова РАН

<sup>2</sup> Открытое акционерное общество «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

Приведены результаты исследований по изучению закономерностей формирования столбчатых наноструктурированных покрытий нитрида титана, предназначенных для защиты от эрозионного и коррозионного износа поверхности рабочих лопаток осевого компрессора газотурбинных двигателей серии НК. Эксперименты проведены при варьировании параметров процесса ионно-плазменного напыления с учётом технологических особенностей обработки сплава ЭИ 961.

*Авиационные газотурбинные двигатели, рабочие лопатки осевого компрессора, полифункциональные покрытия нитрида титана, ионно-плазменное напыление, сплав ЭИ 961, столбчатая микроструктура, наноструктурированные покрытия, микротвёрдость, эрозионная стойкость, усталостная прочность.*

### Введение

При длительной эксплуатации в воздушной среде (особенно с повышенным содержанием влаги, вредных примесей и запылённости) рабочие компрессорные лопатки газотурбинных двигателей подвержены питтинговой коррозии и эрозионному износу. В данной работе задача повышения коррозионной и эрозионной стойкости рабочей поверхности компрессорных лопаток решается посредством использования полифункциональных покрытий нитрида титана, получаемых методом ионно-плазменного напыления. Ранее были разработаны полифункциональные покрытия нитрида титана, получаемые методом ионно-плазменного напыления, которые хорошо себя зарекомендовали в качестве защитных для компрессорных лопаток газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов [1,2] и антифрикционных покрытий для повышения ресурса различных пар трения [3].

Указанные покрытия имели круглозёрненную микроструктуру кубической фазы  $\delta$ -TiN и хороший комплекс физико-механических свойств, удовлетворяющих уровню решения того времени. Задача повышения долговечности и ресурса деталей сегодня предъявляет всё более высокие требования к качеству материала изделий и упорняющих покрытий в том числе. Поэтому целью данной работы являлись оптимизация ионно-плазменной технологии, получение и

изучение закономерностей формирования наноструктурированных покрытий со столбчатой микроструктурой.

### Методика исследований

Первая часть исследований была выполнена в рамках модельного эксперимента на миниатюрных тонкостенных образцах цилиндрической формы из стали ХВГ. Во второй части исследований при адаптации технологии к конкретному изделию использованы образцы из сплава ЭИ 961, вырезанные непосредственно из рабочих лопаток компрессора авиационных ГТД серии НК.

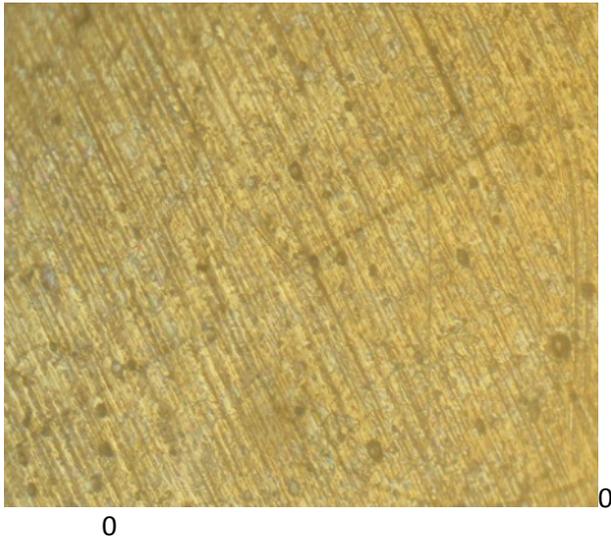
### Результаты исследований

Оптимизация технологического процесса ионно-плазменного напыления проводилась на установке ВУ2-МБС в диапазоне давлений реакционного газа в камере 0,04-0,06 Па при переменных значениях тока дуги 120, 140 и 160 А и постоянном значении опорного напряжения 140 В. Технологический цикл формирования покрытия представлял собой последовательность операций: ионная бомбардировка  $Ti^+$  (с энергией ионов  $E \sim 1$  кэВ) + нанесение подслоя  $\alpha$ -Ti (толщиной  $\sim 0,5$  мкм) + нанесение демпферного слоя состава ( $\alpha$ -Ti+TiN) (толщиной  $\sim 0,8$  мкм) + напыление покрытия TiN (толщиной 3-5 мкм).

В рамках модельного эксперимента изучены закономерности формирования наноструктурированных покрытий нитрида ти-

0

тана при варьировании технологических параметров процесса ионно-плазменного напыления (ток дуги и парциальное давление газа в камере). Установлено, что при всех исследованных режимах напыления в покрытии формируется кубическая фаза  $\delta$ -TiN. На рис. 1 показана микроструктура поверхности покрытия, на рис. 2, 3 – микроструктура TiN в поперечном сечении, полученная методом электронной микроскопии.

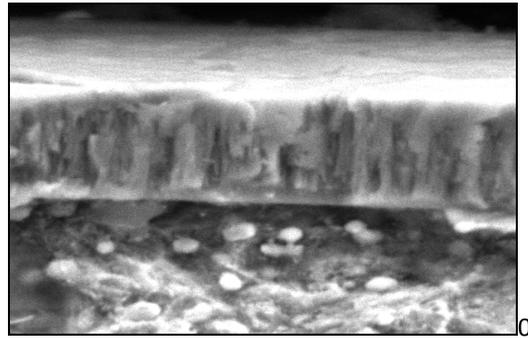


0

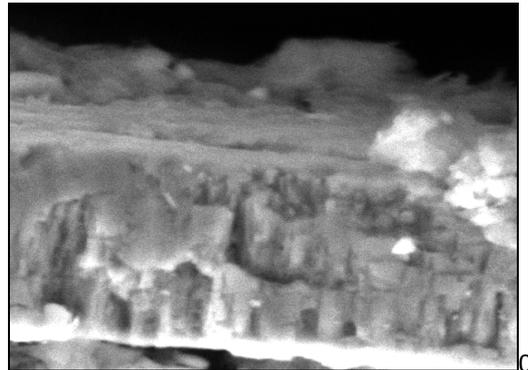
Рис. 1. Микроструктура поверхности покрытия TiN ( $\times 500$ )

Методом электронной микроскопии обнаружено, что при всех режимах напыления формируется столбчатая структура зёрен нитрида титана. Установлена тенденция уменьшения поперечного размера зёрен TiN со снижением тока дуги и парциального давления газа в камере (рис. 4). Наиболее мелкодисперсная структура получена при давлении  $P=0,04$  Па и значении тока дуги  $I_D=120$  А (рис. 3,а). Методом физического уширения рентгеновских линий (111) и (222) TiN определены параметры субструктуры: размер субзёрен  $\sim 54$  нм и величина микродеформаций в них  $\delta\varepsilon/\varepsilon=0,00203$ . Таким образом, оптимальным является режим напыления при давлении газа  $P=0,04$  Па, при котором формируется наноструктурированное столбчатое покрытие нитрида титана.

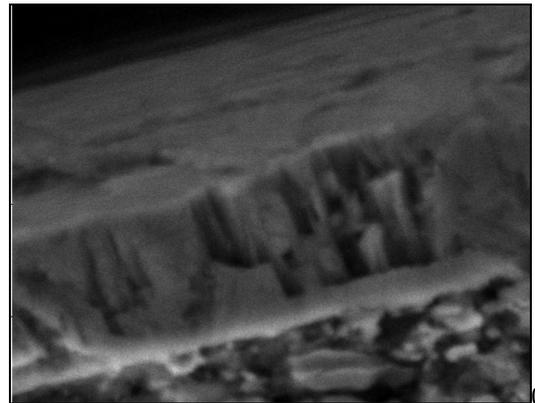
На всех образцах были проведены измерения микротвёрдости композиций «подложка+покрытие» (при нагрузке на индентор 0,5 Н).



а



б



в

Рис. 2. Микроструктура покрытий TiN, полученных при давлении газа  $P=0,06$  Па и разных значениях тока дуги: а – 120 А; б – 140 А; в – 160 А ( $\times 5000$ )

Из экспериментальных значений микротвёрдости рассчитана твёрдость покрытия по формуле, учитывающей влияние подложки при микроиндентировании [4]:

$$H_{\Pi}=H_K + (H_K - H_O) / [2(t/h) + 3(t/h)^2],$$

где  $H_K$  – микротвёрдость композиции;  $H_O$  – микротвёрдость подложки, измеренная при этой же нагрузке;  $h$  – глубина индентирования;  $t$  – толщина покрытия.

На рис. 5 представлены зависимости микротвёрдости покрытий TiN от тока дуги при разных парциальных давлениях реакционного газа.

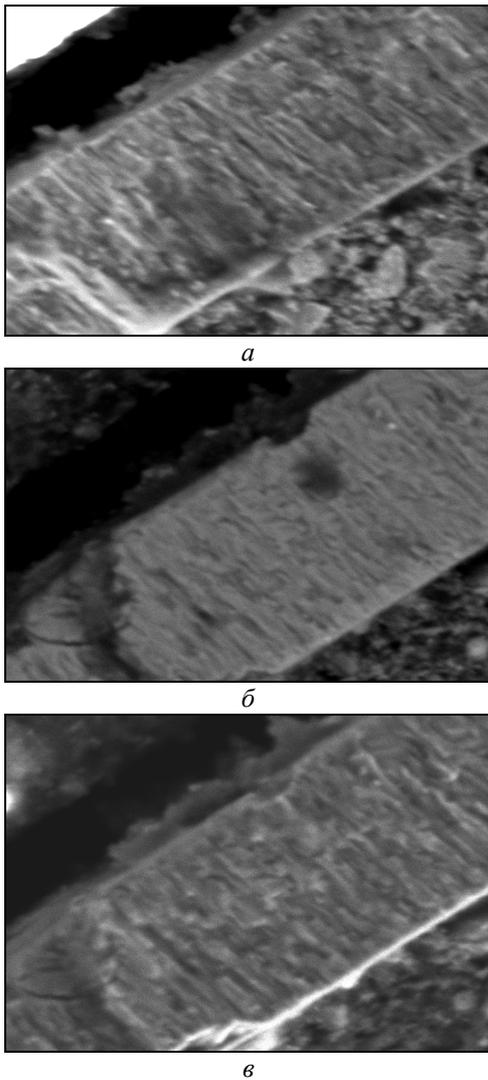


Рис. 3. Микроструктура покрытий TiN, полученных при давлении газа  $P=0,04$  Па и разных значениях тока дуги: а – 120А; б – 140 А; в – 160 А ( $\times 5000$ )

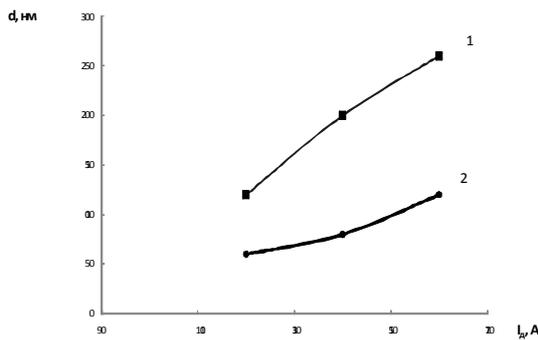


Рис. 4. Зависимость размера столбчатых зёрен TiN от тока дуги: 1 -  $P=0,06$  Па; 2 -  $P=0,04$  Па

Уменьшение размера структурной составляющей покрытия при снижении тока дуги приводит к увеличению микротвёрдости по межзёренному механизму упрочнения [5]. Максимальные значения микротвёрдости зарегистрированы на образцах, полученных при токе дуги 0,04 Па и обладающих самой

мелкодисперсной структурой. На основании полученных результатов выбран режим ионно-плазменного напыления с давлением газа в камере  $P_{N_2}=0,04$  Па.

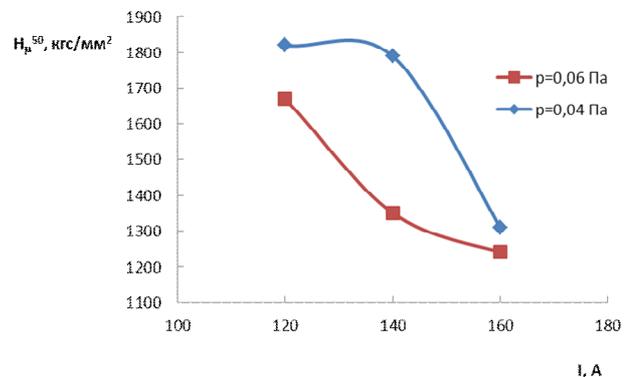


Рис. 5. Зависимости микротвёрдости покрытия TiN от тока дуги при разных парциальных давлениях реакционного газа в камере

В результате оптимизации технологии ионно-плазменного напыления разработаны наноструктурированные покрытия с размером субзёрен  $\sim 50-70$  нм (рис. 4).

После проведения модельного эксперимента была поставлена задача адаптации ионно-плазменной технологии применительно к конкретным изделиям, а именно к рабочим лопаткам компрессора газотурбинного двигателя серии НК с учётом геометрических размеров деталей, технологии их изготовления и особенностей физико-механических свойств сплава ЭИ 961. Следует отметить, что объём загрузки рабочей камеры, условия теплоотвода, температура нагрева и вращение детали во время напыления зачастую приводят к невоспроизводимости результатов, и это необходимо учитывать при внедрении технологии в производство. Поэтому во второй части эксперимента режимы напыления были воспроизведены на готовых лопатках, из которых затем были приготовлены образцы для исследований.

Микроструктура полученных покрытий TiN представлена на рис. 6. На массивных деталях (в отличие от образцов) меняются условия теплопереноса и размеры столбчатых зёрен существенно увеличиваются (рис. 6, а,б). При увеличении тока дуги до  $I_d=160$  А формируется круглозеренная микроструктура покрытия TiN.

Экспериментальные зависимости микротвёрдости композиций «ЭИ 961+TiN» от

0  
глубины индентирования представлены на рис. 7.

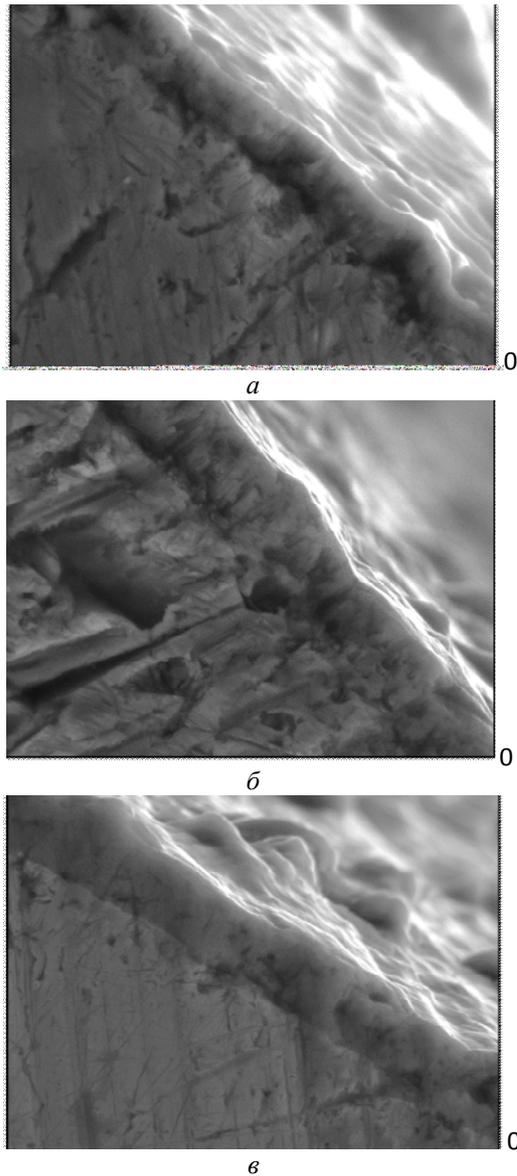


Рис. 6. Микроструктура покрытий TiN на лопатках, полученных при давлении газа  $P=0,04$  Па и разных значениях тока дуги: а – 120А; б – 140 А; в – 160 А ( $\times 5000$ )

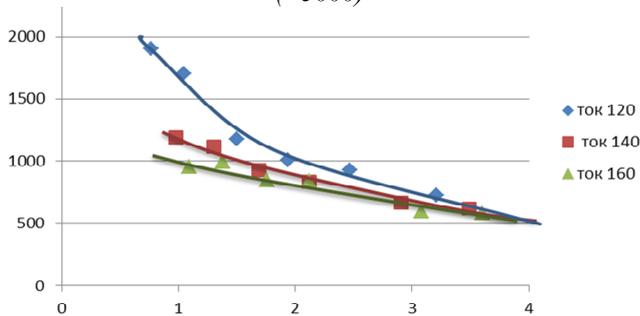


Рис. 7. Зависимости микротвёрдости композиций «подложка+покрытие TiN» на лопатках от глубины индентирования, полученных при давлении газа в камере  $P=0,04$  Па и разных значениях тока дуги

С увеличением глубины индентирования твёрдость постепенно снижается, так

как сказывается влияние подложки. Расчётные значения твёрдости покрытий в зависимости от тока дуги приведены на рис. 8.

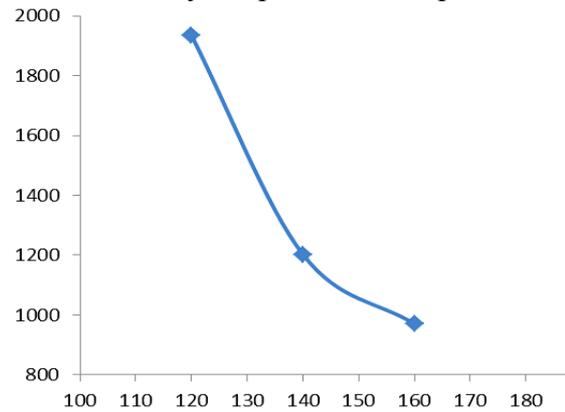


Рис. 8. Зависимость микротвёрдости покрытий TiN на лопатках от тока дуги ( $P=0,04$  Па)

Исходная шероховатость рабочей поверхности лопаток находилась в пределах  $R_a=0,1-0,3$  мкм (9-10 класс обработки). После напыления покрытия морфология поверхности меняется. Из зависимости параметра шероховатости  $R_a$  от тока дуги (рис. 9) видно, что наилучший класс шероховатости поверхности достигается при токе 140 А. С увеличением тока дуги установлено ухудшение класса шероховатости, обусловленное наличием капельной фазы на поверхности покрытия.

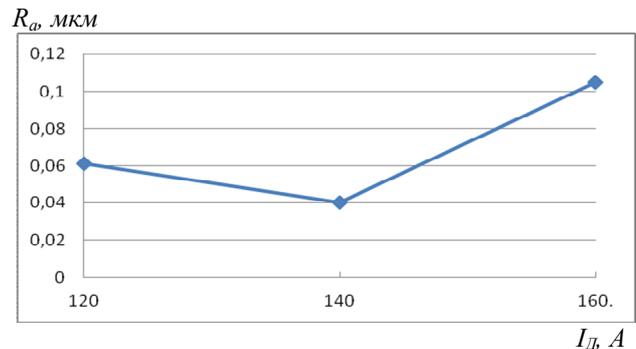


Рис. 9. Зависимость параметра шероховатости покрытий TiN от тока дуги ( $P=0,04$  Па)

0 Испытания на эрозионный износ струёй электрокорунда К-00-04-16 показали (рис. 10), что износостойкость покрытия определяется не только его твёрдостью, но и пластичностью. Наибольшее время износа установлено на покрытии с меньшей микротвёрдостью, обладающем большей вязкостью разрушения. При высоких показателях микротвёрдости преобладают процессы рас-

трескивания и фрагментарного отслаивания покрытия.

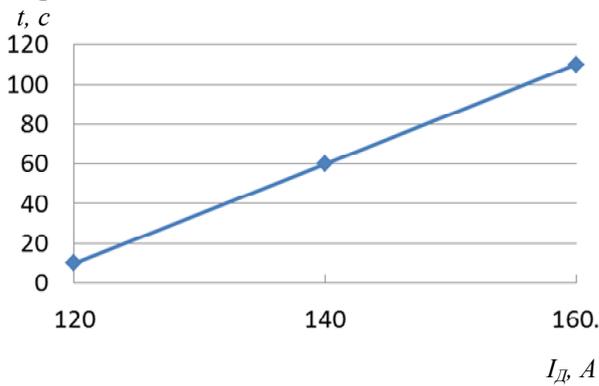


Рис. 10. Зависимость времени износа покрытий TiN, полученных при разных значениях тока дуги ( $P=0,04$  Па)

Особое значение уделено исследованиям изменения свойств основного материала при ионно-плазменном напылении защитных покрытий, так как механические свойства сплава ЭИ 961 имеют ярко выраженную температурную зависимость [6] (табл. 1). В процессе ионно-плазменной обработки происходит сопутствующий нагрев подложки, который должен строго контролироваться. Из анализа имеющихся литературных данных и результатов расчёта коэффициентов пластичности  $\delta_H$  по методике [7] установлено, что верхней границей нагрева сплава ЭИ 961 при напылении является температура 475°C.

При нанесении покрытия TiN на реальные изделия температура контролировалась пирометром с непрерывной записью на монитор компьютера и не превышала 250...300 °C.

После напыления покрытия из контрольных лопаток были нарезаны образцы для исследований. Электронная микроскопия показала, что микроструктура материала лопаток (сплав ЭИ 961) не претерпевает существенных изменений (рис. 11).

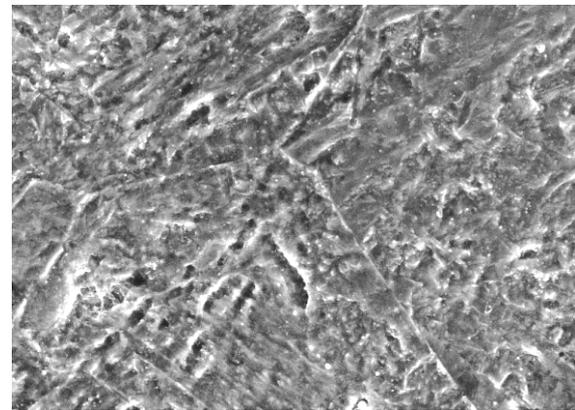
По результатам релаксационных испытаний предел текучести материала находится практически на том же уровне (900 МПа), что и до упрочняющей ионно-плазменной обработки (908 МПа).

В результате проведённого исследования разработан оптимальный режим ионно-плазменного напыления TiN ( $U_{cm}=140$  В,  $P_{N2} = 0,04$  Па,  $I_d=140$ А) для нанесения износостойкого наноструктурированного

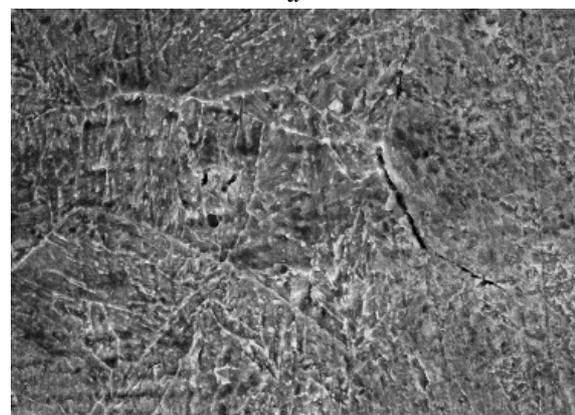
покрытия на рабочие лопатки компрессора ГТД серии НК.

Таблица 1. Механические характеристики сплава ЭИ 961 при разных температурах нагрева (отпуска)

$T$ , °C	$\sigma_m$ , МПа	$\sigma_{np}$ , МПа	КСУ, Дж/мм <sup>2</sup>	НВ, кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta_H$ , отн.ед.
20	1050	1250	80	430	0,840
200	1330	1520	61	432	0,838
300	1330	1470	60	420	0,828
400	1340	1490	61	432	0,821
450	1380	1500	54	440	0,805
475	1430	1530	<b>37</b>	420	<b>0,791</b>
500	1190	1330	71	390	0,792
550	1090	1240	88	337	0,799
600	910	1090	105	380	0,740



а



б

Рис. 11. Микроструктура материала лопаток до (а) и после (б) напыления покрытия TiN ( $\times 5000$ )

Стендовые усталостные испытания показали, что нанесение полифункционального покрытия нитрида титана на опытные лопатки компрессора авиационного газотурбинного двигателя серии НК не приводит к снижению усталостной прочности изделий (табл. 2). Напыление покрытия в оптимальном ре-

0

жиме на новые лопатки (рис. 12) способствует увеличению предела выносливости на 25 % (с 45 до 56,5 кг/мм<sup>2</sup>), а на восстановленных лопатках эффект упрочнения по данному показателю составляет 5 %.

Таблица 2. Результаты усталостных испытаний компрессорных лопаток до и после нанесения покрытий TiN

Вид лопаток	Ток дуги, А	Предел выносливости, кг/мм <sup>2</sup>	Время до разрушения, мин
Без покрытия	---	44-46	67-77
Новые с TiN	120	56,3	85
	140	<b>56,7</b>	84
Восстановленные с TiN	120	46,2	67,3
	140	44,8	76,8

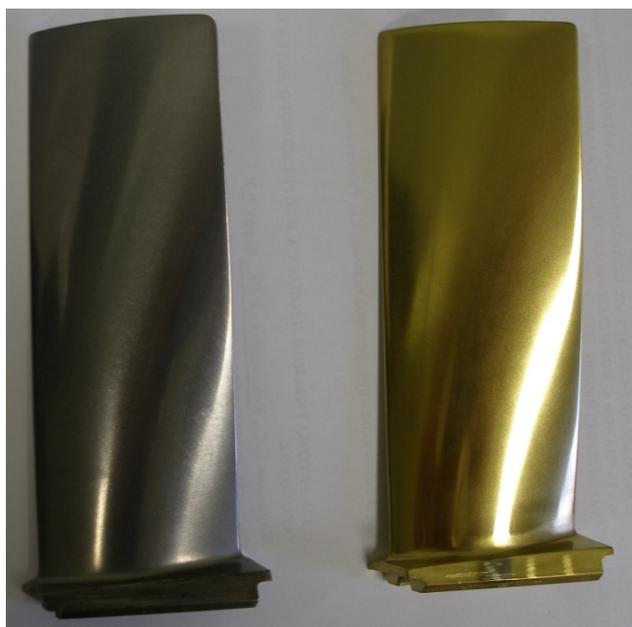


Рис. 12. Рабочие лопатки компрессора авиационного ГТД серии НК до и после напыления оптимизированного покрытия TiN

Разработанная ионно-плазменная упрочняющая технология предназначена для авиационных двигателей, которые будут конвертированы в наземные для использования в составе газоперекачивающих агрегатов. Изготовлен опытный комплект компрес-

сорных лопаток с оптимизированными защитными покрытиями нитрида титана для ввода в эксплуатацию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления №218 от 09.04.2010 г. в сотрудничестве с научными коллективами ОАО «Кузнецов» и СГАУ.

### Библиографический список

1. Тарасенко, Ю.П. Анतिकоррозионная защита компрессорных лопаток газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов ионно-плазменными покрытиями нитрида титана [Текст] / Ю.П. Тарасенко, И.Н. Царева // Компрессорная техника. - 2008. - №7. - С.25-30.
2. Тарасенко, Ю.П. Комплексная восстановительная НПЦ «Трибоника» в действии [Текст] / Ю.П. Тарасенко, И.Н. Царева. - 2010. - №1 (82). - С.34-35.
3. Тарасенко, Ю.П. Оптимизация технологии нанесения ионно-плазменного покрытия нитрида титана на малогабаритные тонкостенные детали [Текст] / Ю.П. Тарасенко, Л.А. Кривина, И.Н. Царева // Вестн. СГАУ. - Самара: 2011. - № 3 (27). - Ч.2. - С.170-174.
4. Тарасенко, Ю.П. Субструктура, механические и фрикционные свойства ионно-плазменных покрытий нитрида титана, полученных при разных парциальных давлениях азота [Текст] / Ю.П. Тарасенко, И.Н. Царева, И.Г. Романов // Изв. РАН. Сер. физическая. - 2002. - Т.66. - №8. - С.1223-1225.
5. Гольдштейн, М.И. Металлофизика высокопрочных сплавов [Текст] / М.И. Гольдштейн, В.С. Литвинов, Б.М. Бронфин - М.: Металлургия, 1986. - 311 с.
6. Шишков, М.М. Марочник сталей [Текст] / М.М. Шишков. - Донецк: Юго-Восток. 2002. - 456 с.
7. Мильман, Ю.В. Характеристика пластичности, получаемая при измерении твердости [Текст] / Ю.В. Мильман, Б.А. Галанов, С.И. Чугунова. - Киев - 1992. - 25 с.

**TECHNOLOGICAL FEATURES OF FORMATION OF THE MULTIFUNCTIONAL NANOSTRUCTURED COVERINGS OF NITRIDE OF THE TITAN FOR COMPRESSOR SHOVELS AVIATION GTD**

© 2012 Yu. P. Tarasenko<sup>1</sup>, I. N. Tsareva<sup>1</sup>, E. P. Kocherov<sup>2</sup>, L. M. Vyazovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> A. A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod branch, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup> JSC «Kuznetsov», Samara

Results of scientific researches on studying of regularities of formation of the stolbchaty nanostructured coverings of nitride of the titan, intended for protection of a surface of working shovels of the axial compressor of gas-turbine engines of a series NK. Experiments are carried out at a variation of parameters of process of an ion-plasma dusting taking into account

*Aviation gas-turbine engines, working shovels of the axial compressor, polifuktsionalny coverings of nitride of the titan, ion-plasma dusting, EI 961 alloy, the stolbchaty microstructure, the nanostructured coverings, microhardness, erosive firmness, fatigue durability.*

**Информация об авторах**

**Тарасенко Юрий Павлович**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. E-mail: [npktribonika@yandex.ru](mailto:npktribonika@yandex.ru). Область научных интересов: ионно-плазменные полифункциональные покрытия нитрида титана.

**Царева Ирина Николаевна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. E-mail: [npktribonika@yandex.ru](mailto:npktribonika@yandex.ru). Область научных интересов: ионно-плазменные полифункциональные покрытия нитрида титана.

**Кочеров Евгений Павлович**, кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора, Открытое акционерное общество «КУЗНЕЦОВ», г. Самара. E-mail: [kotcherov\\_ep@motor-s.ru](mailto:kotcherov_ep@motor-s.ru). Область научных интересов: ионно-плазменные полифункциональные покрытия нитрида титана.

**Вязовская Лидия Михайловна**, заместитель начальника НИЛТ, Открытое акционерное общество «КУЗНЕЦОВ», г. Самара. E-mail: [nilt2010@mail.ru](mailto:nilt2010@mail.ru). Область научных интересов: ионно-плазменные полифункциональные покрытия нитрида титана.

**Tarasenko Yury Pavlovich**, Candidate of Physico-mathematical Sciences, Head of Laboratory, A.A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod. E-mail: [npktribonika@yandex.ru](mailto:npktribonika@yandex.ru). Area of research: polyfunctional coating of nitride of titanium.

**Tsareva Irina Nikolaevna**, Candidate of Physico-mathematical Sciences, A.A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod. E-mail: [npktribonika@yandex.ru](mailto:npktribonika@yandex.ru). Area of research: polyfunctional coating of nitride of titanium.

**Kocherov Evgeniy Pavlovich**, Candidate of Engineering Sciences, deputy Head designer, JSC «KUZNETSOV», Samara. E-mail: [kotcherov\\_ep@motor-s.ru](mailto:kotcherov_ep@motor-s.ru). Area of research: polyfunctional coating of nitride of titanium.

**Vyazovskaya Lydia Mikhaylovna**, deputy chief NILT, JSC «KUZNETSOV», Samara. E-mail: [nilt2010@mail.ru](mailto:nilt2010@mail.ru). Area of research: polyfunctional coating of nitride of titanium.