кредитной технологии обучения, Сборник материалов XX11-ой междунар. конф.''Наука и образование'',16-18апреля 2018г, г.Томск.

4. Беспалько В.П., Татур Ю.Г. Системно-методическое обеспечение учебно-воспитательного процесса подготовки специалистов: учеб.-метод, пособие. — М.: 1989. — 144 с.

5. Гомоюнов К. К. Совершенствование преподавания технических дисциплин: методические аспекты анализа учебных текстов. Л.: Изд-во Леиингр. ун-та, 1983. — 206 с.

НИТРИД ТИТАНОВЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ТУРБИННЫХ ЛОПАТКАХ

Юров В.М.
кандидат физ.-мат. наук, доцент
Карагандинский государственный университет имени Е.А.Букетова,
Казахстан, Караганда
Шельпяков Б.Н.
кандидат технических наук, доцент
Карагандинский государственный университет имени Е.А.Букетова,
Казахстан, Караганда
Гученко С.А.
докторант PhD
Карагандинский государственный университет имени Е.А.Букетова,
Казахстан, Караганда

TITANIUM NITRIDE COATINGS ON TURBINE SHOVELS

Yurov V.
Candidate of phys.-mat. sciences, associate professor
Karaganda State University named after EA. Buketov,
Kazakhstan, Karaganda
Shelpyakov B.
Candidate of technical sciences, associate professor
Karaganda State University named after E.A. Buketova
Kazakhstan, Karaganda
Guchenko S.
PhD student, Karaganda State University named after EA. Buketov,
Kazakhstan, Karaganda

Аннотация

В настоящей работе на турбинные лопатки наносились традиционные нитрид титановые покрытия, но с использованием низкоэнергетического облучения. На основе приведенных примеров использования ионного и ионно-плазменного ассистирования в процессе или после осаждения покрытий можно сделать вывод, что дополнительная бомбардировка газовыми или металлическими ионами позволяет кардинально изменять структуру конденсата.

Abstract

In the present work, traditional nitride titanium coatings were applied to the turbine blades, but using low-energy irradiation. Based on the above examples of the use of ion and ion-plasma assisting during or after deposition of coatings, it can be concluded that additional bombardment with gas or metal ions allows one to radically change the structure of the condensate.

Ключевые слова: турбинная лопатка, нитрид титана, облучение, ионы газа.

Keywords: turbine blade, titanium nitride, irradiation, gas ions.

1. Введение

Лопаточные механизмы довольно часто используются в агрегатах различного назначения. В большинстве случаев их часто используют в турбинах и компрессорах [1-3].

Различают два основных вида турбинных лопаток [4, 5]:

- рабочие - находятся на вращающих валах. Детали передают механическую полезную мощность на присоединенную рабочую машину (часто это генератор). Давление на рабочих лопатках остается постоянным благодаря тому, что направляющие лопатки всю разность энтальпий преобразуют в энергию потока;

- направляющие - закреплены в корпусе турбины. Данные элементы частично преобразуют энергию потока, благодаря чему вращение колес получает тангенциальное усилие. В турбине разница энтальпий должна быть понижена. Это достигается путем уменьшения числа ступеней. Если установить слишком много направляющих лопаток, то срыв потока будет угрожать ускоренному потоку турбины.

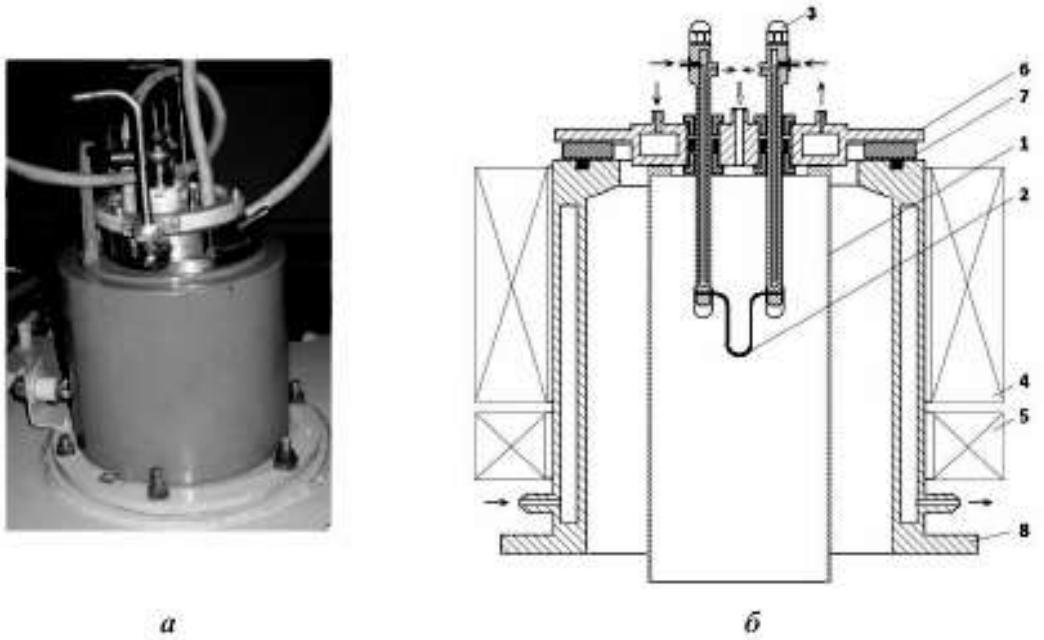
Высокая степень износа основного оборудования в энергетической отрасли ставит задачу повышения срока его эксплуатации. Особенно значимой является проблема увеличения срока службы деталей контактирующих с паром – рабочие лопатки турбин. Нанесение защитных покрытий на рабочие поверхности лопаток турбин – наиболее эффективный способ повышения их качества и долговечности [6-13].

В настоящей работе на турбинные лопатки наносились традиционные нитрид титановые покрытия, но с использованием низкоэнергетического облучения.

2. Методика эксперимента

Нанесение нитрид титановых покрытий на турбинные лопатки проводилось нами на базе установки ННВ-6.6И1.

В качестве источника газовой плазмы применялся плазменный источник «ПИНК» с комбинированным накаленным и полым катодом [14], разработанный в лаборатории плазменной эмиссионной электроники (ЛПЭЭ) ИСЭ СО РАН (рисунок 1).



а *б*

Рисунок 1 Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) плазменного источника «ПИНК» [14]. 1 – катодная полость; 2 – накаленный вольфрамовый катод; 3 – электроввод; 4 – стабилизирующая катушка; 5 – фокусирующая катушка; 6 – водоохлаждаемый фланец; 7 – изолятор; 8 – водоохлаждаемый корпус.

Генератор плазмы «ПИНК» расположен на верхнем фланце камеры ННВ-6.6И1. Источник газовой плазмы «ПИНК» представляет собой плазменный источник на основе несамостоятельного дугового разряда с комбинированным накаленным и полым катодом. На фланце 6 смонтированы два водоохлаждаемых электроввода 3 для питания прямонакального катода 2. Цилиндрический экранный электрод 1 диаметром 90 мм и длиной 350 мм закреплен на вакуумной стороне фланца 6. Катод выполнен из вольфрамовой проволоки длиной 125 мм и толщиной 1,5 мм. Питание накала обеспечивается трансформатором с регулировкой переменного (50 Гц) напряжения по его первичной обмотке. Электрическое питание разряда осуществляется от источника напряжения, включающего в себя трехфазные трансформатор и выпрямитель. Плазменный источник изолирован от корпуса установки и находится под плавающим потенциалом. Газ в источник газовой плазмы подается через газоввод на фланце 6 от системы напуска газа, включающей два регулятора расхода газа РРГ-10.

Источник газовой плазмы «ПИНК» [14, 15] работает по следующему принципу. После подачи газа, стабилизации давления в камере и создании в рабочем объеме плазмогенератора продольного магнитного поля с магнитной индукцией В = 0,1–3 мТл включается накал катода и подается напряжение на электроды разрядной системы. Электроны, эмитируемые термокатодом, ускоряются в направлении к дополнительному электроду, который в момент зажигания разряда выполняет роль вспомогательного анода, и ионизируют газ в катодной полости, тем самым провоцируя зажигание разряда в промежутке накаленный катод-поджигающий электрод. При этом полый катод заполняется плазмой, которая распространяется в вакуумную камеру. Это приводит к переключению горения разряда на основной анод (внутренние стенки вакуумной камеры), т.е. происходит зажигание основного несамостоятельного дугового разряда. Под действием внешнего магнитного поля траектория электронов, эмитировавших с накаленного катода, искривляется. Движение электронов происходит по цилиндрической спирали, что увеличивает их путь к аноду, тем самым приводя к увеличению эффективности ионизации газа.

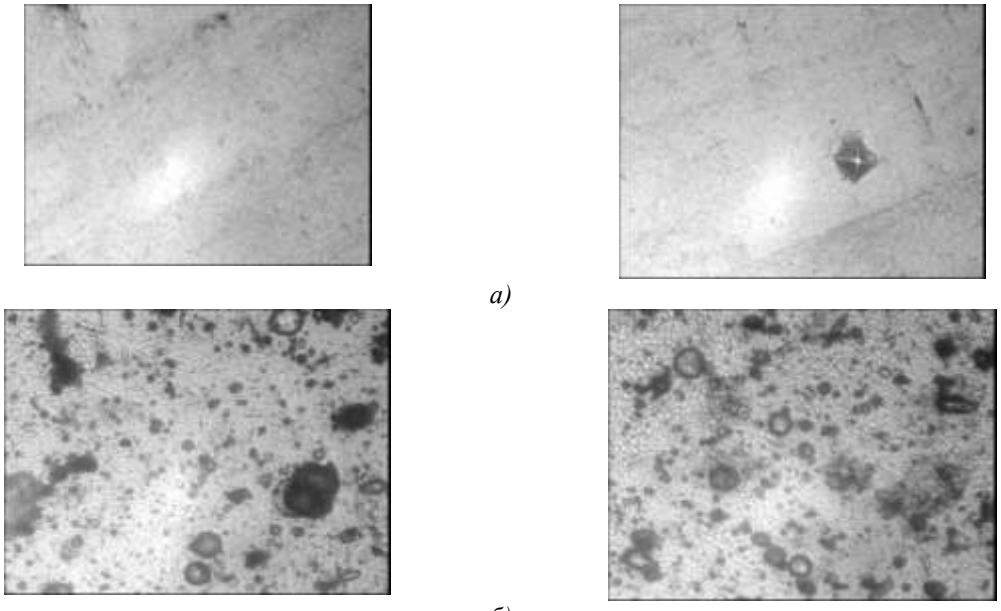
Изменяя ток накала, следовательно, и эмиссию электронов с термокатода, можно легко регулировать ток разряда от десятков до сотен ампер при напряжении горения в несколько десятков вольт. Такой разряд классифицируется как несамостоятельный дуговой разряд с накаленным катодом без катодного пятна. Данный дуговой разряд позволят эффективно генерировать низкотемпературную плазму в больших объемах ($\geq 0{,}1$ м^3) с концентрацией $n_e \sim 10^9$–10^{11} см$^{-3}$ и однородностью не хуже ±15 % от среднего значения. В результате турбинные лопатки имеют вид нитрид титановых покрытий (рис. 2).



Рисунок 2 Турбинные лопатки с нитрид титановым покрытием

3. Обсуждение результатов эксперимента

На рис. 3 показаны результаты до нанесения покрытия нитрида титана на турбинную лопатку из стали 20Х13 и после нанесения покрытия. Эти же результаты отражены в табл. 1.



а)

б)

Рисунок 3 Поверхность образца 20Х13 без покрытия (а) и с покрытием нитрида титана (б)

Таблица 1

Микротвердость μ образца турбинной лопатки без покрытия и с покрытием нитрида титана нанесенного в течении 2-х часов без ПИНК и с ассистированием ПИНК в течение 20 мин при нагрузке HV0,05=0,49N

μ, HV	271,5	263,1	258,7	254,2	269,4	258,4	263,1	**Сред.**	**263,3**
μ, HV	406,3	398,9	401,0	345,1	420,1	408,9	429,2	**Сред.**	**403,3**
μ, HV	986,3	823,9	857,0	883,1	996,2	883,6	854,1	**Сред.**	**909,3**

Из табл. 1 следует, что ассистирование ПИНК приводит к увеличению микротвердости более чем в 3 раза по сравнению исходным образцом и в 2 раза по сравнению с нитрид титановым покрытием.

Ассистирование ПИНК показывает, что структуру покрытия можно изменить, используя ионную бомбардировку. На рис. 4 показано изображение покрытия TiN после облучения азотом.

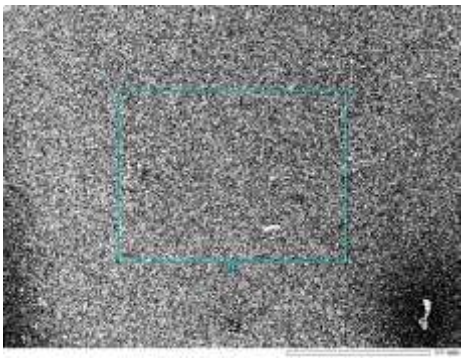


Рисунок 4 Электронно-микроскопическое изображение покрытия TiN после ионной бомбардировки образца 20Х13 (сравни с рис. 3)

Одним из перспективных методов ассистирования процесса синтеза покрытий является низкоэнергетическое ионное облучение [16-18], в ходе которого не происходит существенного изменения системы покрытие/подложка, но появляется возможность регулирования структурно-фазового и элементного состава покрытий, и их свойств.

В [18] показано, что одновременное с напылением титана облучение ионами азота, во-первых, исключает формирование высокоэнергетических нано- и субмикрокристаллических субструктур с высокой кривизной кристаллической решетки и высокой плотностью частичных дисклинаций в границах зерен и связанных с этим высоких локальных напряжений, и во-вторых, оно стимулирует эпитаксиальный механизм формирования нитридной фазы на подложке γ-аустенита, и в-третьих, приводит к повышению пластичности нитридного покрытия (от 3 до 6 %).

Плазменное ассистирование можно использовать при вакуумно-дуговом осаждении покрытий, которое является одним из этапов комплексной обработки сталей [19-21], включающей предварительное ионное азотирование поверхности и последующее нанесение TiN покрытия в едином технологическом цикле. Такая комбинированная обработка стали 40Х позволяет формировать в поверхностном слое нитрид (γ′-Fe4N) и обеспечивает градиентное снижение твердости по глубине образца. Это обеспечивает повышение адгезии TiN покрытия к стальной подложке и существенное увеличение износостойкости полученной композиции.

В [21] показаны эксперименты по осаждению TiN покрытий вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом при токе газового плазмогенератора 10–12 А и токе дугового испарителя 50–100 А, в которых изучалось влияние отрицательного напряжения смещения на формирование ионно-плазменных покрытий, а его значение составляло 15, 200, 600 и 1000 В. Установлено, что при плазменно-ассистированном нанесении покрытия напряжение смещения, прикладываемое к образцу, имеет определяющее значение в изменении структуры и фазового состояния в процессе формирования слоя. Исследования показали, что при малых отрицательных значениях напряжения смещения формируется пластинчатая структура с высоким уровнем упругих полей напряжения. Увеличение смещения приводит к формированию в пластинах наноразмерной поликристалической структуры в результате разбиения на отдельные разориентированные кристаллиты. Оптимальным напряжением смещения оказывается $U_{см}$ = –200 В. Предполагается, что модификация структуры и свойств TiN, осажденных в условиях вакуумно-дугового распыления титана при облучении низкоэнергетическими ионами азота, обусловлена развитием релаксационных процессов вследствие ионного миксинга, генерации точечных дефектов и повышения диффузионной подвижности адатомов на поверхности растущего покрытия.

4. Заключение

На основе приведенных примеров использования ионного и ионно-плазменного ассистирования в процессе или после осаждения покрытий можно сделать вывод, что дополнительная бомбардировка газовыми или металлическими ионами позволяет кардинально изменять структуру конденсата. При ионном стимулировании роста покрытий возможно повысить содержание атомарной и ионной компонент в газовом потоке за счет уменьшения молекулярной составляющей. Энергия, привносимая ионным пучком, может приводить к повышению коэффициента диффузии, что дает возможность наносить покрытия при невысоких температурах, тем самым уменьшая размер зерен. В этом случае, за счет создания дефектов на поверхности пленки и вбивания атомов и молекул испаряемого металла происходит принудительная генерация центров зарождения, что также уменьшает размер зерен вплоть до нанометрового масштаба.

Работа выполнена по программе Министерства образования и науки Республики Казахстан. Гранты №0118РК000063 и №Ф.0781.

Список литературы

1. Бауман Н.Я., Новиков В.А. Технология изготовления рабочих и направляющих лопаток паровых и газовых турбин. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1994. 102 с.

2. Урьев Е.В. Вибрационная надежность и диагностика турбомашин. Ч.1. Вибрация и балансировка. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ, 2003. - 200с.

3. Гонсеровский Ф.Г., Силевич В.М. Технико-экономическое обоснование способа ремонта эрозионно-изношенных паротурбинных лопаток в условиях электростанций // Тяжелое машиностроение. 2001. №9. - С. 21-22.

4. Батурин О.В. Конспекты лекций по учебной дисциплине «Теория и расчет лопаточных машин. - Самара: СГАУ, 2011. - 241 с/

5. Стандарт организации НП «ИНВЭЛ». Турбина паровая Т-100-130 ТМЗ. – Москва, 2009. – 307с.

6. Абраимов Н.В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин. - М.: Машиностроение, 1993. - 336 с.

7. Семенова И.П. Совершенствование технологических процессов изготовления лопаток ГТД из жаропрочных никелевых сплавов с монокристаллической структурой. - Дисс. канд. техн. наук. - Екатеринбург, 1999. - 182 с.

8. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. - М.: «МИСИС». – 2006. - 632 с.

9. Лагерев А.В. Эрозия паровых турбин: вероятностный подход. Т.3. Предотвращение эрозии паровых турбин. – М.: «Машиностроение – 1», 2006. – 255 с.

10. Мубояджян С.А., Лесников В.П., Кузнецов В.П. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. - Екатеринбур: Квист. - 2008. - 208 с.

11. Голубенцев А.В. Повышение усталостных характеристик рабочих лопаток ГТУ на основе совершенствования технологии литья и термической обработки. - Дисс. канд. техн. наук. - Рыбинск, 2016. - 178 с.

12. Логунов А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. – Рыбинск: Издательский дом «Газотурбинные технологии». – 2017. – 854 с.

13. Настека В.В. Повышение эксплуатационных свойств литых лопаток из жаропрочных никелевых сплавов за счет наноструктурирования поверхности. – Дисс. канд. тех. наук, Уфа, 2019. – 118с.

14. Григорьев С.В., Коваль Н.Н., Толкачев В.С. и др. Дуговые разряды низкого давления с полым катодом и их применение в генераторах плазмы и источниках заряженных частиц // Изв. вузов. Физика. – 2001. – Т. 44. – № 9. – С. 28–35.

15. Коростелева Е.Н., Прибытков Г.А., Гурских А.В. Исследование структуры и свойств спеченных материалов титан–медь // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – Спецвыпуск. – Ч. 2. – С. 75–77.

16. Борисов Д.П, Щанин П.М., Коваль Н.Н. Генерация объемной плазмы дуговым разрядом с накаленным катодом // Изв. ВУЗов. Физика. 1994, Т. 37, № 3. - С. 115-121.

17. Винтизенко Л.Г., Григорьев С.В., Коваль Н.Н., Толкачев В.С., Лопатин И.В., Щанин П.М. Дуговые разряды низкого давления с полым катодом и их применение в генераторах плазмы и источниках заряженных частиц. // Изв. ВУЗов. Физика. 2001, Т. 44, № 9. - С. 28-35.

18. Тюменцев А.Н., Коротаев А.Д., Пинжин Ю.П. и др. Влияние низкоэнергетического ионного облучения на микроструктуру покрытий нитрида титана. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 1998, № 10. - С. 92-100.

19. Goncharenko I.M., Grigoriev S.V., Lopatin I.V. et al. Surface modification of steels by complex diffusion saturation in low pressure arc discharge. // Surface and Coatings Technology, 2003, V. 169-170. - P. 419-423.

20. Borisov D.P., Goncharenko I.M., Koval N.N., Schanin P.M. Plasma-assisted deposition of a three-layer structure by vacuum and gas arcs. // IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, V. 26, № 6. - P. 1680-1684.

21. Гончаренко И.М. Комплексное модифицирование сталей и покрытий TiN в плазме дуговых разрядов низкого давления. - Диссертация на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - Томск, 2004. - 168 с.