

В качестве заключения можно отметить. Найдены причины возникновения наибольшей 9-ти секундной и почти суточной нутации вращения Земли, то есть решить задачи более 200-летней и 100-летней давности, а также еще более старую проблему прецессии нашей планеты. Этому способствовали внесенные в теорию гироскопа поправки, приводящие ее в более полное соответствие с механикой.

Литература

1. Арнольд Р.Н., Мондер М. Гиродинамика и ее техническое применение. – М.: Машиностроение, 1964. – 468 с.

2. Жаров В.Е. Нутация неупругой Земли. <http://www.astronet.ru/db/forums/1195760/tree/annot>

3. Михайлов А.А. Земля и ее вращение. – М.: Наука, 1981, 80 с.

4. Гинзбург В. Л. О теории относительности: Сб. статей. – М.: Наука, 1979, – 240 с.

5. Саранчин А.И. Гироскоп от волчка до Вселенной. Монография. – Владивосток: МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2019 – 446 с.

6. Саранчин А.И. Гироскоп от волчка до Вселенной. Монография. eLIBRARY ID: 41107757 <https://elibrary.ru/item.asp?id=41107757>

Yurov V.M.

*Candidate of phys.-mat. sciences, associate professor
Karaganda State University named after E.A. Buketov,
Kazakhstan, Karaganda*

Guchenko S.A.

PhD student

Makhanov K.M.

*Karaganda State University named after E.A. Buketov,
Kazakhstan, Karaganda*

APPLICATION OF STRENGTHENING COATINGS ON TURBINE BLADES

Юров В.М.

*кандидат физ.-мат. наук, доцент
Карагандинский государственный университет имени Е.А. Букетова,
Казахстан, Караганда*

Гученко С.А.

докторант PhD

Маханов К.М.

*кандидат физ.-мат. наук, доцент
Карагандинский государственный университет имени Е.А. Букетова,
Казахстан, Караганда*

НАНЕСЕНИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ТУРБИННЫЕ ЛОПАТКИ

Summary. The work considers the application of ion-plasma coatings on turbine blades. It has been experimentally shown that ion irradiation with a nitrogen coating leads to an increase in microhardness by more than 3 times compared to the initial sample and 2 times compared to a titanium nitride coating.

It is shown that low-energy ion irradiation is a promising method for assisting the process of coating synthesis, during which there is no significant change in the coating / substrate system, but it becomes possible to control the structural-phase and elemental composition of the coatings and their properties. This ultimately leads to hardening of the coating.

Аннотация. В работе рассматривается нанесение ионно-плазменных покрытий на турбинные лопатки. Экспериментально показано, что ионное облучение азотом покрытия приводит к увеличению микротвердости более чем в 3 раза по сравнению исходным образцом и в 2 раза по сравнению с нитрид титановым покрытием.

Показано, что из перспективных методов ассистирования процесса синтеза покрытий является низкоэнергетическое ионное облучение, в ходе которого не происходит существенного изменения системы покрытие/подложка, но появляется возможность регулирования структурно-фазового и элементного состава покрытий и их свойств. Это в конце концов приводит к упрочнению покрытия.

Keywords: *coating, plasma, titanium nitride, ion irradiation.*

Ключевые слова: *покрытие, плазма, нитрид титана, ионное облучение.*

Постановка проблемы

Высокая степень износа основного оборудования в энергетической отрасли ставит перед энергетиками 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.

В настоящей работе показано, что из перспективных методов ассистирования процесса синтеза покрытий является низкоэнергетическое ионное облучение, в ходе которого не происходит существенного изменения системы покрытие/подложка, но появляется возможность регулирования структурно-фазового и элементного состава покрытий и их свойств.

Анализ последних исследований и публикаций

Нанесению защитных покрытий на турбинные лопатки посвящено большое количество статей, монографий, диссертаций. Отметим лишь некоторые работы последних лет [1-6].

Проведенный в работе [7] сравнительный анализ различных технологических процессов упрочнения лопаток показал, что использование в качестве внешнего износостойкого слоя вакуумно-плазменных покрытий имеют преимущества, как с точки зрения минимального изменения размеров изделия, так и времени осаждения элементов покрытия.

В этой же работе [7] сделаны следующие выводы, которые мы будем использовать в дальнейшем:

1. Вакуумно-плазменные покрытия нитрида титана, полученные в условии высоковольтной импульсной стимуляции, имеют высокие характеристики стойкости к абразивному износу

при сравнительно невысокой температуре (до 500 °С), что позволяет рекомендовать их для защиты лопаток паровых турбин ступени низкого давления, изготовленных как из сталей, так и из титановых сплавов.

2. Основным экспресс-критерием стойкости покрытий нитрида титана к абразивному износу может служить твердость поверхности, при повышении которой стойкость в условиях абразивного изнашивания увеличивается.

3. Использование покрытий из нитридов высокоэнтропийных сплавов дает наибольший эффект при их применении в виде защитных на лопатках газотурбинных двигателей, где важно сохранение высоких механических характеристик при больших температурах (превышающих 1300 °С).

Эксперимент

Здесь мы опишем режим нанесения покрытия на лопатку турбины.

Предварительная подготовка:

1. Визуальный осмотр и предварительная очистка лопатки бязью смоченной Нефрасом С2-80/120, с целью удаления остатков смазки.

2. Очистка и полировка лопатки в ванне установки электролитно-плазменной полировки ЭПП-40 (рис. 1), при следующих параметрах: состав раствора для полировки -5% водный раствор сульфата аммония; температура раствора- 85° С; напряжение катод-анод 300 В, ток 40 А; длительность обработки 6 мин.



Рисунок 1 - Установка электроимпульсного полирования ЭПП-40

3. После выгрузки из ванны ЭПП-40, лопатка промывается в ультразвуковой ванне (рис. 2) и обрабатывается паром при помощи пароструйного устройства УПС 4.3-гейзер (рис. 3).



Рисунок 2 - Ультразвуковая ванна для очистки деталей

4. После пароструйной очистки лопатка протирается бязью смоченной спиртом и помещается в сушильный шкаф с целью сушки и предварительного прогрева до 150 °С.

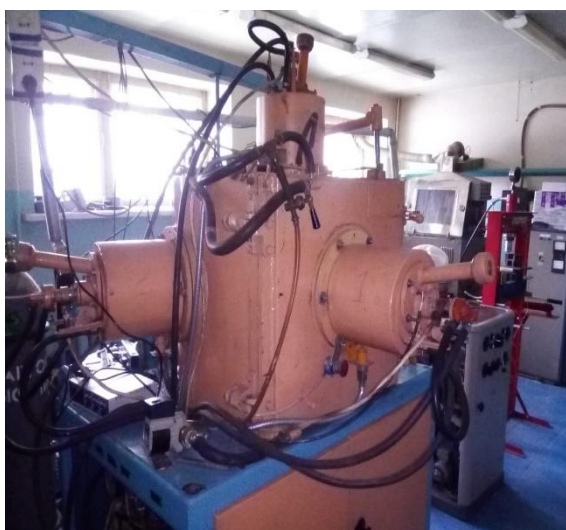


Рисунок 3 - Пароструйное устройство УПС 4.3-гейзер

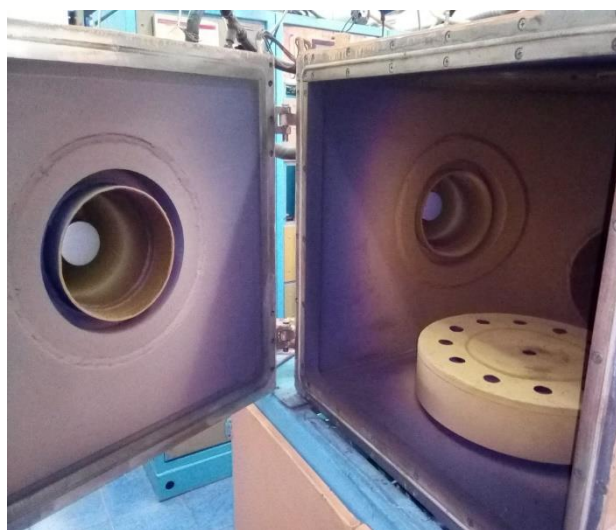
Процесс напыления:

1. Подготовленная лопатка устанавливается в вакуумную камеру установки ННВ 6.6-

И1 (рис. 4 а) при помощи оснастки на сателлит вращающегося стола (рис. 4 б).



а)



б)

Рисунок 4 - Вакуумная камера установки ННВ 6.6-И1 (а) и сателлит вращающегося стола (б)

2. Производится форвакуумная откачка камеры установки до давления 1Па (время около 15мин.).

3. Дальнейшая откачка камеры производится высоковакуумным диффузионным насосом до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па. (время 20-25 мин.).

4. Затем в камеру через натекаль газа производится напуск аргона и с помощью блока управления электромагнитным натекалем «БУЭН» поддерживается давление в камере $2 \cdot 10^{-1}$ Па.

5. Для проведения процесса ионной очистки и нагрева включается плазменный источник с накалимым катодом ПИНК, устанавливается ток накала 120 А и ионный ток 5А.

6. Включается блок опорного напряжения и на деталь подается напряжение смещения -1000 В.

7. Включается привод вращения стола и устанавливается скорость вращения 5 об/мин.

8. В течении 5-7 мин. ионный ток ПИНК плавно доводится до 65-70 А, при этом производится контроль нагрева лопатки при

помощи пирометра Смотрич 7 сфокусированного на детали через смотровое окно камеры.

9. При достижении температуры 450°C (время 20-25 мин.) прекращается подача аргона и в камеру напускается азот особой чистоты, давление при этом поддерживается на уровне $1,8-2,2 \cdot 10^{-1}$ Па.

10. Включаются электродуговые испарители (3 дуговика) с установленными титановыми катодами марки Вт 1-00, ток дуги 95 А, ток фокусирующей катушки 0,3 А, ток стабилизирующей катушки 0,9А.

11. Опорное напряжение снижается до 250 В, ток ПИНК 65-70А.

12. При установленных параметрах, в режиме напыления с ионным ассистированием, происходит формирование нитрид-титанового покрытия на поверхности лопатки.

В процессе нанесения покрытия необходим постоянный контроль температуры. При снижении температуры с 450°C до 420°C необходимо повысить температуру путем кратковременного повышения опорного напряжения до 1000 В.

Продолжительность нанесения покрытия составляет 2 ч. При заданных параметрах напыления толщина покрытия 10-12 мкм.

13. После завершения напыления выключаются дуговые испарители и производится дополнительное азотирование покрытия, для чего напряжение смещения повышается до 500 В, ионный ток ПИНК 60А время 20 мин.

14. Далее прекращается подача газа, выключается ПИНК, прекращается подача опорного напряжения, выключается вращение стола и при достижении лопаткой температуры 150 °С происходит напуск атмосферного воздуха в камеру и выгрузка лопатки.

В результате турбинные лопатки имеют вид нитрид титановых покрытий (рис. 5).

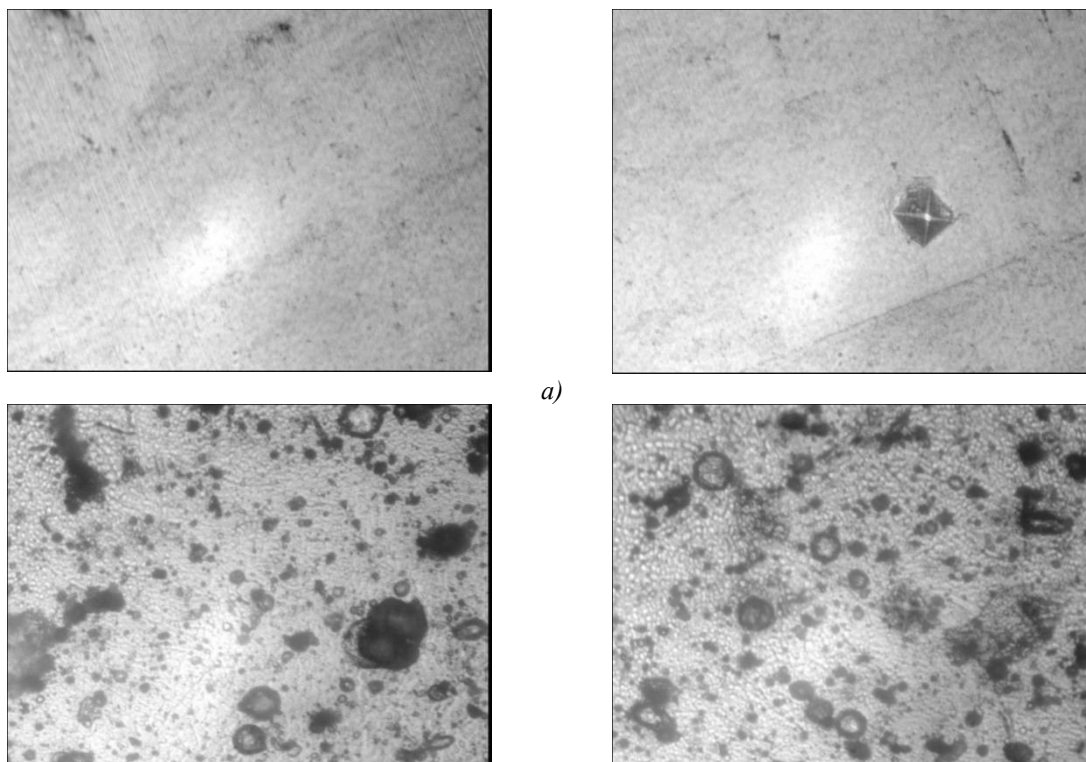


Рисунок 5 - Турбинные лопатки с нитрид титановым покрытием

Обсуждение результатов эксперимента

На рис. 6 показаны результаты до нанесения покрытия нитрида титана на образец из стали

20X13 и после нанесения покрытия. Эти же результаты отражены в табл. 1.



a)

б)

Рисунок 6 - Поверхность образца 20X13 без покрытия (а) и с покрытием нитрида титана (б)

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	Среднее	263,3
μ , HV	406,3	398,9	401,0	345,1	420,1	408,9	429,2	Среднее	403,3
μ , HV	986,3	823,9	857,0	883,1	996,2	883,6	854,1	Среднее	909,3

Из табл. 1 следует, что ассистирование ПИНК по схеме 13 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. 7 показано изображение покрытие TiN после облучения азотом.

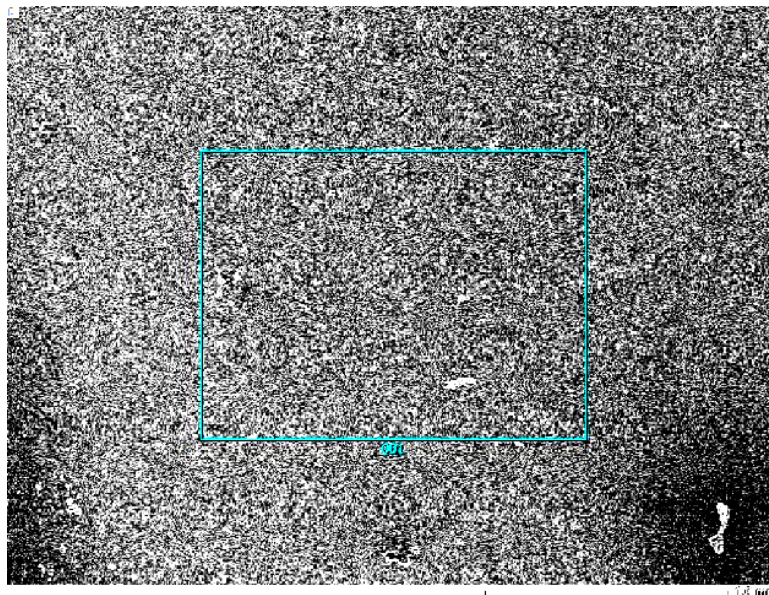


Рисунок 7 - Электронно-микроскопическое изображение покрытия TiN после ионной бомбардировки образца 20X13 (сравни с рис. 6)

Результат эксперимента показал, что одним из перспективных методов ассистирования процесса синтеза покрытий является низкоэнергетическое ионное облучение. При этом в ходе облучения не происходит существенного изменения системы покрытие/подложка, но появляется возможность регулирования структурно-фазового и элементного состава покрытий и их свойств [8-10].

Например, в [11] показано, что одновременное с напылением титана облучение ионами азота, во-первых, исключает формирование высокоэнергетических нано- и субмикроструктур 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 механизм формирования нитридной фазы на подложке γ -аустенита, и в-третьих, приводит к повышению пластичности нитридного покрытия (от 3 до 6 %)

Выводы и предложения

Описанные результаты эксперимента и использование газоразрядной плазмы, генерируемой источником газовой плазмы, для плазменного ассистирования во время вакуумно-

дугового синтеза покрытий проводились при фиксированных параметрах плазменного генератора «ПИНК».

Низкоэнергетическое ионное облучение нитридных покрытий существенно увеличивает их качество и долговечность.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РК. Гранты №0118РК000063 и №Ф.0781.

Литература

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. - М.: «МИСИС». - 2006. - 632 с.
2. Лагерев А.В. Эрозия паровых турбин: вероятностный подход. Т.3. Предотвращение эрозии паровых турбин. - М.: «Машиностроение - 1», 2006. - 255 с.
3. Мубояджян С.А., Лесников В.П., Кузнецов В.П. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. - Екатеринбург: Квист. - 2008. - 208 с.
4. 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.

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

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

7. Соболев О.В., Дмитрик В.В., Погребной Н.А., Пинчук Н.В., Мейлехов А.А. Апробация структурного подхода для оптимизации режимов получения покрытий, повышающих износостойкость лопаток турбин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2015, №2/5(74). – С. 52-59

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. Крысина О.В. Генерация газометаллической плазмы в дуговых разрядах низкого давления для синтеза многокомпонентных нанокристаллических защитных покрытий. – Дисс. канд. тех. наук, Томск, 2016. -192 с.