

**В.А. Білоус, В.М. Воєводін, В.М. Хороших, Г.І. Носов, В.Г. Марінін, С.О. Леонов,
В.Д. Овчаренко, В.І. Коваленко, А.А. Комарь, А.С. Купрін, Л.О. Шпагіна**

Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,
вул. Академічна, 1, Харків, 61108, Україна, тел. +38 (057) 335 07 55

СТВОРЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ І ОСНОВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЙОМІВ ОТРИМАННЯ КАВІТАЦІЙНО-СТІЙКИХ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА РОБОЧИХ ПОВЕРХНЯХ ЛОПАТОК ПАРОВИХ ТУРБІН З ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ6 З МЕТОЮ ЗАМІЩЕННЯ ІМПОРТУ АНАЛОГІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ



Створено експериментальне устаткування і основні технологічні прийоми отримання кавітаційно-стійких захисних покриттів вакуумно-дуговим методом на робочих поверхнях лопаток парових турбін з титанового сплаву ВТ6. Зроблено вибір і обґрунтовано склад та умови синтезу оптимального покриття для зміцнення лопаток. Відпрацьовано параметри процесу осадження покриттів на макеті лопатки, отримано дослідний технологічний процес осадження зміцнюючих покриттів. Проведено випробування зразків зі сплаву ВТ6 з вибраними покриттями в імітаційних умовах, близьких до експлуатаційних. Здійснено осадження покриття на макет лопатки з габаритними розмірами до 130 см і вагою до 30 кг. Швидкість осадження покриття на основі TiN складала ~10 мкм/г.

Ключові слова: покриття, вакуумно-дуговий метод, кавітаційна стійкість, лопатки турбін.

Відповідно до державної програми щодо імпортозаміщення ВАТ «Турбоатом» налагодило серійний випуск лопаток парових турбін з титанового сплаву ВТ6 для заміни аналогічних виробів у ряді турбін АЕС, які відпрацювали свій ресурс. Згідно з технічними вимогами до згаданих лопаток після їх виготовлення для забезпечення потрібного ресурсу роботи на робочі поверхні лопаток потрібно нанести кавітаційно-стійкі захисні покриття, оскільки вони будуть працювати в зоні низького тиску турбіни з великою долею конденсату в парі. У зв'язку з цим виникає необхідність виконання робіт по створенню і реалізації нових вітчиз-

няних технологій для реалізації програми імпортозаміщення в енергомашинобудуванні.

На сьогоднішній день на ряді турбін АЕС України лопатки останньої ступені турбін НТ відпрацювали свій ресурс та потребують заміни. В зв'язку з цим Національна атомна енергогенеруюча компанія (НАЕК) «Енергоатом» доручила ВАТ «Турбоатом» освоїти виробництво згаданих лопаток із сплаву ВТ6. Оскільки для цих лопаток документацією на їх виготовлення передбачено нанесення антикавітаційних покриттів, а завод не має ні відповідного обладнання ні технологій, то ВАТ «Турбоатом» звернулося в Національний науковий центр (ННЦ) «ХФТІ» з проханням створити необхідні технології та обладнання.

В ННЦ «ХФТІ» є багаторічний досвід проведення таких робіт, в т.ч. для зміцнення лопа-

ток середніх ступенів. Однак у зверненні ВАТ «Турбоатом» мова йде про лопатки зі сплаву ВТ6 з максимальною довжиною ~1300 мм та вагою ≥ 30 кг. Досвіду роботи з такими деталями і устаткування для обробки таких великогабаритних виробів в ННЦ «ХФТІ» на початок роботи не було. В зв'язку з цим необхідно було в короткий термін розробити концепцію установки для реалізації замовлення, створити дослідний зразок установки та відповідні технологічні прийоми, відпрацювати найбільш доцільні за характеристиками покриття, провести необхідні для обґрунтування вибору конструкції та процесів дослідження на згаданому зразку установки і, в кінцевому результаті, мати експериментальний зразок – прототип установки. Це дозволить випускати дослідні зразки продукції та обґрунтувати їх придатність для експлуатації в реальних умовах, а в подальшому налагодити серійний випуск необхідної продукції.

Метою проекту є розробка концепції установки і основ технологічних процесів та реалізація обох напрямків у дослідному зразку установки для нанесення кавітаційно-стійких покриттів на великогабаритні лопатки парових турбін із титанового сплаву ВТ6 для АЕС України.

У ході реалізації науково-технічних та організаційних заходів, спрямованих на досягнення мети проекту, передбачалося вирішити такі основні завдання:

- ✦ розробка і монтаж лабораторної установки для нанесення вакуумно-дугових покриттів на лопатки завдовжки до 1300 мм і вагою до 30 кг;
- ✦ вибір та обґрунтування складу покриття для зміцнення лопаток із сплаву ВТ6 та створення лабораторних технологій;
- ✦ відпрацювання параметрів процесу осадження покриттів;
- ✦ випробування покриттів на лопатках в імітаційних умовах, близьких до експлуатаційних;
- ✦ нанесення покриттів на дослідні зразки макетів лопаток із сплаву ВТ6;
- ✦ підготовка обладнання для випуску дослідних зразків лопаток з покриттями.

РОЗРОБКА, МОНТАЖ І НАЛАГОДЖЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ПОКРИТТІВ НА ЛОПАТКИ

Основна концепція при створенні устаткування для нанесення зміцнюючих покриттів на титанові лопатки турбін полягала в необхідності забезпечення таких можливостей: обробка великогабаритних лопаток в технологічному об'ємі установки; використання для зміцнення лопаток сучасних іонно-плазмових технологій модифікації поверхні титанових лопаток; проведення технологічного процесу зміцнення титанових лопаток з максимальною продуктивністю і точністю контролю його параметрів.

Великі розміри і вага оброблюваних виробів – лопаток турбін – обумовили основні труднощі при створенні установки і викликали необхідність нестандартного підходу до розробки лабораторної установки. У результаті пошуків і аналізу відомого устаткування була обрана 3-модульна конструкція вакуумної камери установки, що складалася з трьох послідовно з'єднаних вакуумних камер базової установки «Булат-6».

На початковому етапі робіт було виконано монтаж та випробування агрегатів і вузлів, які забезпечують необхідні вакуумні умови в установці для отримання покриттів. Були виготовлені, підключені й налагоджені системи електроживлення установки. Ці роботи включали таке: монтаж та наладка шести випарників металу; наладка і підключення джерел живлення дуги; наладка і підключення випрямляча іонного бомбардування; наладка системи подачі і підтримки тиску реактивного газу в робочому об'ємі установки.

У остаточному вигляді установка складалася з вакуумно-плазмового агрегату, випрямляча іонного бомбардування, джерел живлення дуги, стійки управління і засобів діагностики плазми. До складу вакуумно-плазмового агрегату входять: 3-модульна вакуумна камера з шістьма джерелами плазми і поворотним пристроєм, система відкачування, гідросистема і система подачі газу. Вакуумна камера виконана із сталі Ст. 3 і має циліндричну форму (рис. 1).

Вісь камери орієнтована вертикально. Загальна довжина 3-модульної камери — 1500 мм, діаметр — 500 мм. На нижньому і верхньому торцях камери за допомогою шарнірних петель закріплені кришки. На бічних стінках камери є шість горловин з однаковими фланцями, до яких кріпляться: джерела плазми і горловина, до якої закріплюється перехідник до системи відкачування. Також на бічній поверхні камери розміщені штуцер для напуску робочого газу і кронштейн для кріплення регулятора тиску газу, що автоматично підтримує тиск газу на заданому рівні. Для забезпечення рівномірності покриття, яке наноситься, установка забезпечена поворотним пристроєм, а джерела плазми розташовані на трьох ярусах. Поворотний пристрій, що забезпечує обертально-поступальне переміщення макету лопатки, закріплений на верхній кришці вакуумної камери, до нього кріпиться оброблюваний макет лопатки.

Корпус і кришки камери охолоджуються проточною холодною водою у режимі вимірювання параметрів плазми і нанесення покриттів і прогріваються гарячою водою в режимах розгерметизації, знегажування і відкачування. Всі роз'ємні з'єднання ущільнюються прокладками з вакуумної гуми.

Камера з'єднується перехідним пристроєм з високовакуумним агрегатом. На цьому пристрої розміщені: клапан для напуску атмосферного повітря в камеру, клапан системи вентиляції і блок вимірювальних ламп (ПМТ-1, ПМИ-10) — датчиків вакуумметра ВИТ-3.

Контроль температури здійснюється дистанційно за допомогою інфрачервоного пірметра типу «Смотрич» крізь вікно в камері з флюоритовим склом.

ПЕРСПЕКТИВНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Подальше збільшення потужності енергетичних турбін АЕС, що є нагальною потребою при побудові нових станцій, вимагає від розробників обладнання для збільшення його надійності і економічності використовувати новітні мате-



Рис. 1. Загальний вид експериментальної установки з 3-модульною конструкцією вакуумної камери для осадження кавітаційно-стійких покриттів на лопатки турбін

ріали або модифікувати ті, що розроблені раніше. В зв'язку з цим при проектуванні і виготовленні ряду елементів потужних парових турбін відбувається заміна сталі на титанові сплави. Проте титан і його сплави мають низьку зносостійкість поверхні, що вимагає її модифікації з метою поліпшення експлуатаційних характеристик. Нанесення функціональних покриттів на робочі поверхні виробів для поліпшення їх експлуатаційних характеристик є найбільш ефективним методом направленої модифікації поверхневих властивостей матеріалів.

Для реалізації методу модифікації поверхневих властивостей матеріалів знайшло найбільше промислове застосування вакуумно-дугове осадження захисних покриттів. Серед матеріалів покриттів, які отримують цим способом, велико-

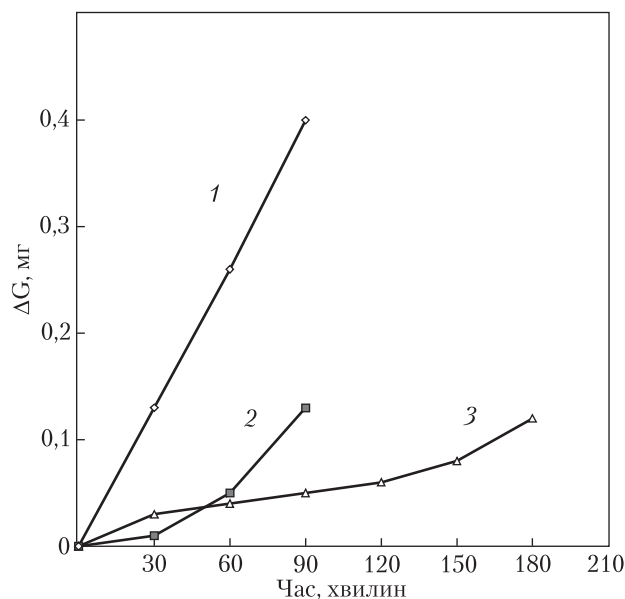


Рис. 2. Кінетичні криві кавітаційного зносу поверхні зразків зі сплаву ВТ6: без покриття (1); з TiN покриттями, отриманим при тиску азоту: $p = 0,2$ Па (2) і при $p = 2,0$ Па (3)

го поширення набули сполуки на основі нітридів перехідних металів і зокрема нітриду титану, легуваного одним або декількома хімічними елементами [1]. Переваги нітридів полягають в їх великій твердості, тугоплавкості, пластичності при високих температурах, високій зносостійкості, високій корозійній стійкості та ін. Отримані синтезом із плазми титану у присутності азоту нітридні покриття дають можливість широкої зміни їх структури, текстури та властивостей шляхом зміни розміру зерен, кристалографічної орієнтації, дефектів ґрат, текстури, а також фазового складу і морфології поверхні.

Нітрид титану завдяки його високим фізико-механічним, теплофізичним, антикорозійним і іншим характеристикам, а також відносній дешевизні і безпеці у виробництві є одним з найширше використовуваних матеріалів покриттів для зміцнення сплавів. Найбільш стійкі до різних типів зносу нестехіометричні монофазні покриття на основі TiN з мікротвердістю близько 25 ГПа. При цьому вміст азоту в них складає близько 40 % [2]. Покриття TiN успішно використовуються для підвищення ерозійної і коро-

зійної стійкості лопаток парових турбін з титанових сплавів, а також лопаток компресорів авіаційних газотурбінних двигунів [3, 4].

Останнім часом проводяться інтенсивні дослідження взаємозв'язку структурно-фазового стану і функціональних властивостей нітридних покриттів залежно від методів і умов їх синтезу. Як виявилось, істотної зміни структури і властивостей нітридних покриттів вдалося досягти в результаті легування такими елементами, як Si, B, Al, Y, Ni, Cr та ін. При цьому було показано, що надзвичайно висока ефективність легування нітридних покриттів цими нерозчинними в рівноважних умовах елементами обумовлена їх термодинамічно контролюваною сегрегацією по межах зерен TiN з формуванням зернограничної фази, що обмежує зростання зерна [5]. В ННЦ «ХФТІ» синтезована серія нітридних покриттів різного складу: TiN; Ti+TiN; (Ti-Al)N; (Ti-Al-Si)N; (Ti-Al-Y)N; (Ti-Zr)N; TiCN, досліджено їх структурні, текстурні, антикорозійні, антиерозійні, антикавітаційні характеристики [6–8].

На сьогодні найбільш ефективними щодо зносостійкості є покриття на основі TiAlN. При збереженні високих фізико-механічних характеристик нітриду титану вони мають додаткові важливі властивості, а саме: при нагріванні на повітрі їх поверхня покривається щільним шаром окислу алюмінію (з мікротвердістю 12–13 ГПа) [9], що перешкоджає подальшому окисленню покриття і адгезійній взаємодії з матеріалом основи. Введення до складу покриття на основі TiAlN хрому та ітрію значно покращує їх стійкість до окислення.

На рис. 2 наведено кінетичні криві кавітаційного зносу покриттів різного складу: Ti–N; (Ti–Al)N; (Ti–Al)N + 0,4 ваг. % Y; (Ti–Al)N + 1 ваг. % Y.

Сепарацію плазових потоків від макрочасток при нанесенні покриттів здійснювали за допомогою прямолінійного магнітоелектричного фільтру [10]. Дані рис. 2 показують, що на кінетичних кривих фактично є три ділянки. Перша ділянка відповідає видаленню з поверх-

ні покриття слабкозв'язаних частинок, друга — руйнуванню власне покриття, третя — руйнуванню покриття спільно з підкладкою.

Середні швидкості кавітаційного і абразивного зносу (Ti—Al—Y)N покриттів в 3—5 разів нижчі, ніж покриттів (Ti—Al)N і до 10 разів нижче, ніж TiN, що обумовлено ключовою роллю ітрію в придушенні стовпчастого зростання і формуванні нанокристалічної структури з міцними міжзеренними межами. Звідні дані щодо механічних властивостей легованих нітридних покриттів наведені в табл. 1 [6].

Вакуумно-дуговий процес нанесення нітридних TiSiN покриттів [6, 7] проведено в суміші газів з різними пропорціями використаних газових компонент — азоту і аргону. Під тиском газової суміші $p > 5 \cdot 10^{-3}$ Торг знайдено режим найбільшої твердості покриттів і отримана залежність твердості від кількості аргонної компоненти у складі суміші. При вмісті аргону на рівні 8—12 % були отримані покриття з твердістю ~50 GPa, що перевищує в 1,7 рази твердість покриттів, отриманих в середовищі азоту.

Введення до складу покриття на основі TiN хрому покращує стійкість останнього до окислення. Мікротвердість TiCrN-покриттів знаходиться в межах 25—39 ГПа. Бомбардування підкладки іонами хрому сприяє покращенню її адгезії з покриттям; хром також підвищує опір окисленню [6, 11]. Добавка хрому у складі тита-

нового катода дозволила істотно поліпшити фізичні і захисні властивості покриттів базового TiN-складу. Добавка хрому до складу базового покриття на основі TiN переводить його з розряду твердих покриттів в розряд надтвердих. Як позитивний результат від добавки хрому в склад покриття необхідно відмітити істотне зниження модуля пружності в порівнянні з базовим TiN-покриттям та істотне зростання коефіцієнтів H/E і H^3/E^2 , що характеризують зносостійкість і міцність властивості осаджуваних конденсатів. Добавка хрому в покриття на основі TiN також підвищує в 2 рази антикорозійну стійкість. Покриття на основі TiCrN показують вищі результати щодо зносостійкості, ніж покриття на основі TiN. Проте за характеристиками ці покриття поступаються TiAlN-покриттям.

Покриття на основі TiCN мають вищу твердість і низький коефіцієнт тертя в порівнянні з нітридом титану. Карбонітриди перехідних металів привертають увагу завдяки їх унікальним властивостям, таким, як висока твердість, електропровідність, висока температурна стійкість, пружність і опір корозії. Покриття TiCN твердіші, ніж TiN, але крихкіші і окислюються при значно нижчих температурах [12]. Мікротвердість покриттів залежить від складу і тиску реакційної суміші в процесі нанесення, збільшується із збільшенням вмісту ацетилену і може досягати 40 ГПа [8].

Таблиця 1

Зведені дані по механічних властивостях легованих нітридних покриттів

Склад, ваг. %	Товщина, мкм	Твердість H, ГПа	Модуль Юнга E, ГПа	H^3/E^2 , ГПа	Ra, нм	Кавітаційний знос, мг/г	Абразивний знос, мг/г
TiN масивний		26	468	0,08			
TiN	10	31	438	0,16	47	0,93	0,05
(Ti + TiN) × 6	6	29	380	0,17	63	1,66	
Ti ₉₈ Al ₂ N	10	36	437	0,24	50		0,1
Ti ₉₀ Al _{8,5} Si _{1,5} N	10	40	452	0,31	36	6,99	0,02
Ti ₆₈ Al _{1,7} Y _{0,3} N	10	37	448	0,25	21		0,04
Ti _{69,5} Al ₃₀ Y _{0,5} N	12	30				0,125	
Ti ₅₅ Zr ₄₅ N	6	35	400	0,27		0,38	

**ВИПРОБУВАННЯ ЗРАЗКІВ ІЗ ПОКРИТТЯМИ
НА КАВІТАЦІЙНИЙ ТА АБРАЗИВНИЙ ЗНОС, ВИБІР
ОПТИМАЛЬНОГО СКЛАДУ ПОКРИТТІВ**

Випробування зразків з покриттями на стійкість до кавітаційно-ерозійного зносу проводилося на спеціальному стенді [13, 14]. Стенд містить магнітострикційний вібратор з концентратором ультразвукових коливань, який розташований у ванні з водою і імітує інтенсивний водно-ударний вплив на зразки з покриттями.

Під час виконання наукового дослідження щодо впливу виду та складу покриттів на їх стійкість до зносу встановлено, що всі досліджувані зразки покриттів показали поліпшення характеристик в порівнянні з вихідними зразками. За результатами попередніх досліджень експериментальних зразків з покриттями встановлено, що найбільш перспективними для практичного використання як кавітаційно-

Таблиця 2

**Втрата маси зразків з ВТ6
з різними видами покриттів в ході випробувань
на кавітаційно-ерозійний знос в мг**

Покриття	t, год.			
	0,5	1,5	2,0	3,5
	Знос, мг			
TiN – p(N ₂) = 0,2 Па	0,01	0,13		
TiN – p(N ₂) = 2 Па	0,03		0,06	0,12
Ti-TiN (40 шарів)	0,20			
Ti-TiN (15 шарів)	0,22			
TiCN	0,29			
TiCrN	0,32			
TiVN	0,10			

Таблиця 3

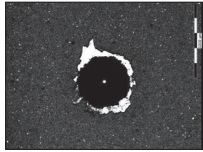
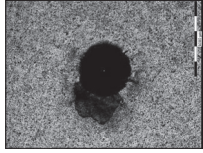
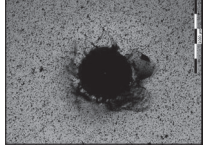
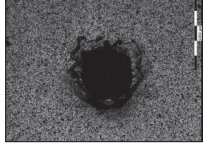
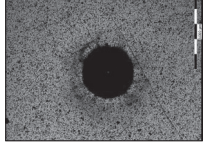
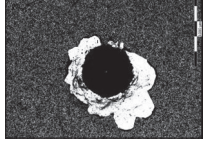
**Абразивний знос в умовах
тертя зразків з ВТ6 з TiN покриттями**

Покриття	Δt, год.	ΔG, мг
TiN – p(N ₂) = 0,2 Па	0,5	0,11
TiN – p(N ₂) = 2 Па	0,5	0,18
ВТ6 без покриття	0,5	56,80

стійких для лопаток турбін виявилися однокомпонентні покриття на основі TiN і багатокомпонентні леговані покриття на основі TiN (TiN, TiN + Ti, TiAlN, TiCrN, TiCN). На зразки зі сплаву ВТ6 були нанесені відібрані перспективні види зміцнюючих покриттів товщиною 10 мкм. Були проведені випробування зразків з титанового сплаву ВТ6 з вибраними покриттями на стенді для дослідження стійкості зразків при дії кавітації.

Таблиця 4

Дані по визначенню нанотвердості, модуля пружності і адгезії покриттів (TiN, Ti-TiN, TiCrN, TiVN і TiCN) на зразках з титанового сплаву ВТ8

Покриття	H, ГПа	E, ГПа	Роквелл-тест	Адгезія, балл
Ti – TiN (40 шарів)	20	300		HF5
TiN – p(N ₂) = 2 Па	25	450		HF4
TiN – p(N ₂) = 0,2 Па	26	400		HF4
TiCrN	25	400		HF3
TiVN	27	400		HF1
TiCN	25	420		HF6

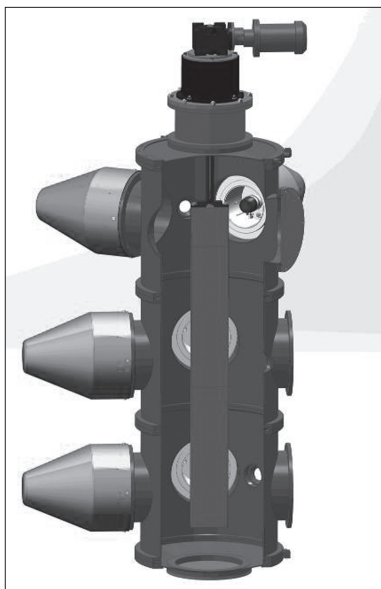


Рис. 3. Схема розміщення макету лопатки на вузлі обертання усередині 3-модульної вакуумної камери

В табл. 2 наведені дані по вивченню стійкості зразків з покриттями проти кавітаційно-ерозійного зносу, отримані в процесі випробувань.

Як впливає з результатів, наведених в табл. 2, найбільшу стійкість до кавітаційно-ерозійного зносу показали зразки зі сплаву ВТ6 з покриттями на основі TiN. На рис. 2 показані кінетичні криві кавітаційного зносу поверхні зразків зі сплаву ВТ6 без покриттів і зразків з TiN-покриттями, отриманими при різному тиску азоту (0,2 Па і 2 Па).

У табл. 3 показані дані по абразивному зносу поверхні зразків зі сплаву ВТ6 з TiN-покриттями, отриманими при різному тиску азоту ($1 - p = 10^{-1}$ Па; $2 - p = 3,0$ Па), від часу випробувань.

У табл. 4 наведені дані з визначенням нанотвердості, модуля пружності і адгезії покриттів (TiN, Ti-TiN, TiCrN, TiVN і TiCN) на зразках із титанового сплаву ВТ8. Адгезія визначалася методом Роквелл-С-тесту шляхом втискування діамантового індентора при навантаженні 150 кг. Бали ставилися згідно з роботою [15].

На підставі результатів випробувань для подальшої роботи відібрані TiN-покриття, нанесені на підкладки з титанового сплаву ВТ6 при

різному тиску азоту ($p_{N_2} = 2$ Па і $p_{N_2} = 0,2$ Па). Зразки з цими покриттями показали задовільну адгезію (табл. 4), помітно вищу стійкість до кавітаційно-ерозійного зносу (табл. 2) і до абразивної ерозії в умовах тертя (табл. 3). При цьому покриття на основі TiN, отримані при вищому тиску азоту, мають перевагу перед іншими, оскільки зі збільшенням тиску азоту до ~ 1 Па мікротвердість покриттів знижується, вони стають монофазними і стійкішими до зносу і ерозії [16]. При цьому також зменшуються кількість і розміри краплинної фази.

Таким чином, за сукупністю вимог до покриттів і на основі результатів випробувань, а також з урахуванням економічного чинника для нанесення на макет лопатки обрано однокомпонентне покриття на основі TiN з відповідним фазово-структурним станом. Відповідно до технічних умов для зміцнення титанових лопаток турбін рекомендуються товщини покриттів на основі TiN в діапазоні 8–40 мкм.

ОСАДЖЕННЯ ПОКРИТТІВ НА ДОСЛІДНІ ЗРАЗКИ ТА МАКЕТИ ЛОПАТОК ІЗ СПЛАВУ ВТ-6

Для відпрацювання параметрів та оптимізації процесу нанесення покриттів було зроблено макет лопатки турбіни. Макет лопатки яв-

Таблиця 5

Основні характеристики установки для осадження нітридних покриттів на макети лопаток турбін

Параметри	Значення
Граничний вакуум у вакуумній камері (тиск), Па	$1,33 \times 10^{-3}$
Робочий тиск азоту, Па	2...3 Па
Робочий газ	N_2
Кількість випарників	6
Розміщення випарників	3-ярусне
Щільність струму іонів, А/м ²	1...300
Максимальний розмір оброблюваних виробів, см	≤ 130
Вага оброблюваних виробів, кг	≤ 30
Швидкість осадження TiN, мкм/г	10
Потужність, споживана установкою при осадженні покриттів, квт	До 45

ляє собою пластину, виконану з титанового сплаву ВТ6. Довжина пластини — 1200, ширина — 125 і товщина — 22 мм. По периметру пластини були зроблені заглиблення, в яких закріплювалися за допомогою гвинтів зразки з титанового сплаву ВТ6 у вигляді дисків діаметром 18 мм і завтовшки 3 мм.

Для забезпечення рівномірності покриття, що наноситься, джерела плазми розташовані на трьох ярусах вакуумної камери, а установка забезпечена поворотним пристроєм, на якому кріпиться макет лопатки, причому поворотний пристрій забезпечує не тільки обертальний, але і поступальний рух по осі камери (вгору і вниз). Для загрузки макета лопатки в камеру була розроблена, виготовлена і змонтована система витягання з вакуумної камери вузла обертання з оброблюваною деталлю — макетом лопатки. На рис. 3 показано схему розміщення закріпленого на вузлі обертання макета лопатки усередині вакуумної камери.

Для вимірювання швидкості нанесення нітридних покриттів зразки зі сплаву ВТ6 зважувалися перед завантаженням в камеру і після проведення процесу нанесення покриттів. Швидкість нанесення TiN-покриттів на макеті лопатки складала ~10 мкм/г. У табл. 5 наведені основні характеристики розробленої установки для нанесення нітридних покриттів на макети лопаток турбін.

ВИСНОВКИ

1. Головні результати виконання проекту:

- ✦ створено експериментальне устаткування і основні технологічні прийоми отримання кавітаційно-стійких захисних покриттів на робочих поверхнях лопаток парових турбін з титанового сплаву ВТ6;
- ✦ проведено розробку, монтаж, налагодження і апробацію лабораторної установки з 3-модульною вакуумною камерою для нанесення зміцнюючих вакуумно-дугових покриттів на лопатки турбін завдовжки до 1300 мм і вагою до 30 кг.

2. Результати заходів, виконаних у процесі виконання проекту:

- ✦ розроблено концептуальний проект установки для нанесення вакуумно-дугових кавітаційно-стійких покриттів на великогабаритні лопатки при забезпеченні можливостей обробки великогабаритних лопаток в технологічному об'ємі установки, використання для зміцнення лопаток сучасних іонно-плазмових технологій модифікації поверхні титанових лопаток, проведення технологічного процесу зміцнення титанових лопаток з максимальною продуктивністю і точністю контролю його параметрів;
- ✦ змонтована та налагоджена установка з 3-модульною вакуумною камерою, шістьма випарниками і джерелами електроживлення;
- ✦ виготовлена технологічна документація на дослідний лабораторний процес нанесення кавітаційно-стійких покриттів на титанові лопатки зі сплаву ВТ6;
- ✦ відібрано перспективні покриття і нанесені на зразки із сплаву ВТ6, проведено випробування зразків з покриттями на стійкість до кавітаційно-ерозійного і абразивного зносу.

3. Наукові результати виконання проекту:

- ✦ розроблені основи технологічних прийомів нанесення захисних покриттів на великогабаритні вироби зі сплаву ВТ6;
- ✦ синтезовано серію нітридних покриттів різного складу (TiN; Ti + TiN; (Ti—Al)N; (Ti—Al—Si)N; (Ti—Al—Y)N; (Ti—Zr)N у відповідності з технологічними прийомами, досліджено їх структурні, антикорозійні, антиерозійні і антикавітаційні характеристики;
- ✦ проведено порівняльний аналіз усіх характеристик разом з економічними оцінками, обґрунтовано вибір перспективних покриттів та оптимізовано їх склад;
- ✦ розроблено, виготовлено та апробовано на повногабаритних макетах лопаток макет (прототип) установки для синтезу захисних покриттів на великогабаритних лопатках зі сплаву ВТ6, досліджено основні робочі ха-

рактики прототипу, що дає можливість наносити покриття на дослідні партії лопаток та значно скорочує час та витрати на створення промислової установки.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П.* Методологические принципы создания функциональных покрытий нового поколения для применения в инструментальном производстве // Инженерный журнал. — 2011. — № 12. — С. 18–22.
2. *Sue J.A.* Development of arc evaporation of non-stoichiometric titanium nitride coatings // *Surface and Coating technology*. — 1993. — V. 61. P. 115–120.
3. *Смыслов А.М., Дыбленко Ю.М., Смыслова М.К.* Технология и оборудование для упрочнения больше-размерных лопаток паровых турбин из титановых сплавов / Харьковская научная ассамблея, ICUTE-6, Харьков. — 21–26 апреля 2003. С. 173–177.
4. *Мухин В.С., Смыслов А.М., Боровской С.М.* Модифицирование поверхности деталей ГТД по условиям эксплуатации. — М.: Машиностроение, 1995. — 256 с.
5. *Коротаев А.Д., Мошков В.Ю., Овчинников С.В., Пинжин Ю.П., Савостников В.М., Тюменцев А.Н.* Наноструктурные и нанокompозитные сверхтвердые покрытия // *Физическая мезомеханика*. — 2005. — Т. 8, № 5. С. 103–116.
6. *Белюс В.А., Васильев В.В., Голтвяница С.К., Голтвяница В.С., Заднепровский Ю.А., Коваленко В.И., Куприн А.С., Ломино Н.С., Лучанинов А.А., Маринин В.Г., Овчаренко В.Д., Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е., Толмачёва Г.Н.* Абразивная и кавитационная стойкость TiN покрытий легированных Al, Si, Y // *Вестник двигателестроения*. — 2012, № 1 (26). — С. 201–205.
7. *Белюс В.А., Заднепровский Ю.А., Ломино Н.С., Соболев О.В.* Роль аргона в газовой смеси с азотом при получении нитридных конденсатов системы Ti–Si–N в вакуумно-дуговых процессах осаждения // *Журнал технической физики*. — 2013. — Т. 83, вып. 7. — С. 69–76.
8. *Кунченко В.В., Андреев А.А.* Карбонитриды титана, полученные вакуумно-дуговым осаждением // *Вопросы атомной науки и техники, сер. ФРП и РМ*. — 2001. — **79**, № 2. — с. 116–120.
9. *Roos J.R., Selis O.Z., Vancoille E., Veltrop H., Boelens S., Jugblut F., Ebberink J., Homberg H.* Inter-relationship between processing coating properties and functional properties of steered arc physically vapour deposited (TiAl)N and (TiNb)N coatings // *Thin Solid Films*. — 1990. — V. 193/194. — P. 547–556.
10. *Aksenov I.I., Khoroshih V.M., Lomino N.S. Ovcharenko V.D., Zadneprovskiy Y.A.* Transformation of axial vacuum arc plasma flows into radialstream and their use in coating deposition // *IEEE Trans. on Plasma Science*. — 1999. — V.27, № 4. — P. 1026–1029.
11. *Pfluger E., Schroer A., Voumard P., Donohue L., Munz W.-D.* Influence of incorporation of Cr and Y on the Wear performance of TiAlN coatings at elevated temperatures // *Surface and Coatings Technology*. — 1999. — V. 115. — P. 17–23.
12. *Bertoncello R., Casagrande A., Casarin M., Glisenti A., Lanzoni E., Mirengi I., Tondello E.* TiN and Ti(C, N) film characterisation and its relationship to tribological behavior // *Surface and Interface Analysis*. — 1992. — V. 18. — P. 525–531.
13. *Коваленко В.И., Маринин В.Г.* Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікроударному діянні // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «ФРП и РМ»*. — 1998. — № 5. С. 83–85.
14. *Коваленко В.И., Маринин В.Г.* Прочность поверхностных слоев циркониевых сплавов и вакуумно-дуговых покрытий при микроударном воздействии // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. — 2008. — № 1. — С. 77–80.
15. *Heinke W., Matthews A., Berg G., Friedrich C., Broszeit E.* Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests // *Thin Solid Films*. — 1995. — 270. — P. 431–438.
16. *Parsons N.C.* The development of large wetsteam turbines / *parsons NS* // *Trans. North East Coast institutions of Engineers and shipbuilders*. — 1972. — 89. — P. 31–42

REFERENCES

1. Vereschaka A.S., Grigorjev S.N., Tabakov V.P. Metodologicheskie printsipy sozdaniya funkcionanyh pokrytity novogo pokoleniya dlja primeneniya v instrumentalnom proizvodstve. *Inzhenernyy zhurnal*. 2011, 12: 18–22 [in Russian].
2. Sue J.A. Development of arc evaporation of non-stoichiometric titanium nitride coatings. *Surface and Coating technology*. 1993, 61: 115–120.
3. Smyslov A.M., Dyblenko Iu.M., Smyslova M.K. Tekhnolohyia i oborudovanye dlia uprochneniya bolshe-razmernih lopatok parovykh turbin iz tytanovykh splovov. In: *Kharkovskaia nauchnaia assambleia, ICUTE-6*. April 21-26, 2003, Kharkov [in Russian].
4. Mukhyn V.S., Smyslov A.M., Borovskoi S.M. *Modyfytirovanye poverkhnosti detalei HTD po usloviyam ekspluatatsyy*. Moskva: Mashynostroeniye, 1995 [in Russian].
5. Korotaev A.D., Moshkov V.Y., Ovchinnikov C.V., Pinjin Y.P., Savostnikov V.M., Tyumentsev A.N. Nanostrukturnye i nanokompозитnye sverhtverdye pokrytitya. *Fizicheskaja mezo-mekhanika*. 2005, 8(5): 103–116 [in Russian].
6. Belous V.A., Vasiljev V.V., Goltvjanitsa S.K., Goltvjanitsa V.S., Zadneprovskiy Y.A., Kovalenko V.I., Kuprin A.S.,

- Lomino N.S., Luchaninov A.A., Marinin V.G., Ovcharenko V.D., Reshetnjak E.N., Strelnitskiy V.E., Tolmatcheva G.N. Abrazivnaja i kavitatsionnaja stoikost TiN pokrytivy legirovanyh Al, Si, Y. *Vestnik dvoigatelestroenija*. 2012, 1(26): 201–205 [in Ukrainian].
7. Belous V.A., Zadneprovskiy Y.A., Lomino N.S., Sobol O.V. Rol argona v gazovoy smesi s azotom pri poluchenii nitridnyh kondensatov sistemy Ti–Si–N v vakuumno-dugovyih protsessah osazhdeniya. *Zhurnal tehnicheckoy fiziki*. 2013, 83(7): 69–76 [in Ukrainian].
8. Kunchenko V.V., Andreev A.A. Karbonitridy titana, poluchennyye vakuumno-dugovym osazhdeniem. *Voprosy atomnoy nauki i tehniki, Ser. «FRP i RM»*. 2001, 79(2): 116–120 [in Ukrainian].
9. Roos J.R., Selis O.Z., Vancoille E., Veltrop H., Boelens S., Jugblut F., Ebberink J., Homberg H. Inter-relationship between processing coating properties and functional properties of steered arc physically vapour deposited (TiAl)N and (TiNb)N coatings. *Thin Solid Films*. 1990, 193/194: 547–556.
10. Aksenov I.I., Khoroshih V.M., Lomino N.S., Ovcharenko V.D., Zadneprovskiy Y.A. Transformation of axial vacuum arc plasma flows into radialstream and their use in coating deposition. *IEEE Trans. on Plasma Science*. 1999, 27(4): 1026–1029.
11. Pfluger E., Schroer A., Voumard P., Donohue L., Munz W.-D. Influence of incorporation of Cr and Y on the Wear performance of TiAlN coatings at elevated temperatures. *Surface and Coatings Technology*. 1999, 115: 17–23.
12. Bertoncecello R., Casagrande A., Casarin M., Glisenti A., Lanzoni E., Mirengi I., Tondello E. TiN and Ti(C, N) film characterisation and its relationship to tribological behavior. *Surface and Interface Analysis*. 1992, 18: 525–531.
13. Kovalenko V.I., Marinin V.G. Obladnannya dlya doslidzhennya eroziyi pokrytivy pri mikroudarnomu diyanni. *Voprosy atomnoy nauki i tehniki, Ser. «FRP i RM»*. 1998, 5: 83–85 [in Ukrainian].
14. Kovalenko V.I., Marinin V.G. Prochnost poverhnostnyih sloev tsirkonievyyih splavov i vakuumno-dugovyih pokrytivy pri mikroudarnom vozdeystvii. *Voprosy atomnoy nauki i tehniki, Ser. «Vakuun, chistye materialy, sverhprovodniki»*. 2008, 1: 77–80 [in Ukrainian].
15. Heinke W., Matthews A., Berg G., Friedrich C., Broszeit E. Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests. *Thin Solid Films*. 1995, 270: 431–438.
16. Parsons N.C. The development of large wetsteam turbines. *Trans. North East Coast institutions of Engineers and shipbuilders*. 1972, 89: 31–42.

V.A. Belous, V.N. Voevodin, V.M. Khoroshikh, G.I. Nosov,
V.G. Marinin, S.A. Leonov, V.D. Ovcharenko,
V.I. Kovalenko, A.A. Komar, A.S. Kuprin, L.O. Shpagina

National Science Center
Kharkiv Institute of Physics and Technology,
the NAS of Ukraine,
1, Akademichna Str., Kharkiv, 61108, Ukraine,
tel. +38 (057) 335 07 55

EXPERIMENTAL EQUIPMENT
AND BASIC TECHNOLOGICAL METHODS
OF OBTAINING CAVITATION PROTECTIVE
COATINGS ON WORKING SURFACES
OF STEAM TURBINE BLADES MADE
OF TITANIUM ALLOY VT6
IN ORDER TO REPLACE IMPORTS
OF SIMILAR PRODUCTS

The experimental equipment and basic technological methods of obtaining cavitation protective coatings on the working surfaces of blades of steam turbines from titanium alloy VT6 have been created. The selection and the basis of the composition and conditions of synthesis of optimal coating for hardening blades have been justified. The parameters of deposition process of coatings on the blade model have been worked, the experimental technological deposition process of hardening coatings has been created. The tests of titanium alloy VT6 samples with the preferred coatings in simulation conditions close to operational have been conducted. The coatings on the blade model of length up to 130 cm and weight up to 30 kg have been deposited. The velocity of the TiN coating depositing was ~10 mkm/h.

Keywords: coatings, vacuum-arc method, cavitation firmness, blades of turbines.

V.A. Белоус, В.Н. Воеводин, В.М. Хороших, Г.И. Носов,
В.Г. Маринин, С.А. Леонов, В.Д. Овчаренко,
В.И. Коваленко, А.А. Комарь, А.С. Куприн, Л.О. Шпагина

Национальный научный центр
«Харьковский физико-технический институт»
НАН Украины,
ул. Академическая, 1, Харьков, 61108, Украина,
тел. +38 (057) 335 07 55

СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ И ОСНОВНЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОМ ПОЛУЧЕНИЯ
КАВИТАЦИОННО-СТОЙКИХ ЗАЩИТНЫХ
ПОКРЫТИЙ НА РОБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ
ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН ИЗ ТИТАНОВОГО
СПЛАВА VT6 С ЦЕЛЮ ЗАМЕЩЕНИЯ ИМПОРТА
АНАЛОГИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

Создано экспериментальное оборудование и основные технологические приемы получения кавитационно-стойких защитных покрытий вакуумно-дуговым методом на рабочих поверхностях лопаток паровых турбин из титанового сплава VT6. Сделан выбор и обоснован состав и условия синтеза оптимального покрытия для упрочнения лопаток. Отработаны параметры процесса осаждения покрытий на макете лопатки, получен опытный технологический процесс осаждения упрочняющих покрытий. Проведено испытание образцов из сплава VT6 с выбранными покрытиями в имитационных условиях, близких к эксплуатационным. Осажены покрытия на макет лопатки с габаритными размерами до 130 см и весом до 30 кг. Скорость осаждения покрытия TiN составила ~10 мкм/ч.

Ключевые слова: покрытия, вакуумно-дуговой метод, кавитационная стойкость, лопатки турбин.

Стаття надійшла до редакції 28.03.16