

потоках формулы тяги, (7), (8), полетного (тягового) КПД, (10), (11), (12), (16), (17), теоремы о подъемной силе продуваемого профиля, (13), (14), (15), лопастей второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов, раскрыты все преимущества последних перед однорядными и контрвращающимися гребными винтами.

Исходя из вышеизложенного, очередная статья будет касаться краткого сравнительного анализа однорядных, контрвращающихся, спутновращающихся гребных винтов, в которой последовательно будет показано и доказано, что наиболее эффективными гребными винтами являются спутновращающиеся, поскольку только в этих гребных винтах полностью устраняется кинематическая зона жесткого (упругого) удара, что позволит увеличить обороты и тягу второго рабочего колеса спутновращающихся гребных винтов в 2–3 раза по сравнению с расчетными оборотами и тягой однорядных гребных винтов.

#### Литература

1. Патент 35561, Україна, МПК В63Н 1/14, В63Н 1/28, В63Н 5/00. Судновий двигуно-рушійний комплекс [Текст] / Б. Ш. Мамедов. — № U200805116, заявл. 21.04.2008, опубл. 25.09.2008, Бюл. № 18, 2008.
2. Справочник по малотоннажному судостроению [Текст] / Составитель Б. Г. Мордвинов. — Ленинград: Судостроение, 1988. — 576 с.
3. Мамедов, Б. Ш. Глава 2. Основы единой теории движителей на непрерывных потоках. Вывод формулы тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной силе продуваемого профиля, как движителя [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. — 2011. — № 33. — С. 146–153.
4. Мамедов, Б. Ш. Глава 9. Основы единой теории движителей на непрерывных потоках. Вывод формулы тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной силе продуваемого профиля единичного размаха. как движителя на непрерывных потоках (краткая теория крыла самолета) [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. — 2012. — № 50(956). — С. 3–17.
5. Казанджан, П. К. Теория авиационных двигателей [Текст] / П. К. Казанджан, Н. Д. Тихонов, А. К. Янко. — М.: Машиностроение, 1983. — 223 с.
6. Мамедов, Б. Ш. Глава 1. Основы единой теории движителей на непрерывных потоках. вывод формулы тяги, полетного (тягового) КПД турбореактивных двигателей [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2011. — Т. 4, N 7(52). — С. 15–20.
7. Мамедов, Б. Ш. Глава 7. Основы единой теории движителей на непрерывных потоках. Вывод формулы тяги, полетного (тягового) КПД, теоремы о подъемной силе продуваемого профиля крыла птицы, как движителя [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. — 2012. — № 44. — С. 11–20.
8. Мамедов, Б. Ш. Основы единой теории движителей на непрерывных потоках. Вывод формулы тяги паруса [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — Т. 5, N 7(59). — С. 11–17.
9. Мамедов, Б. Ш. Применение уравнения Эйлера для вывода формул тяги, полетного (тягового) КПД воздушно-реактивных двигателей по внешним параметрам газового потока при  $V_n \geq 0$  [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. — 2013. — № 4(978). — С. 3–15.
10. Мамедов, Б. Ш. Единая теория движителей. Вывод формул тяги, полетного (тягового) КПД ракетных двигателей [Текст] / Б. Ш. Мамедов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2013. — Т. 1, N 7(61). — С. 67–71.

#### ДО ЄДИНОЇ ТЕОРІЇ РУШІВ НА НЕПЕРЕРВНИХ ПОТОКАХ — СТИСЛА ТЕОРІЯ СУПУТНООБЕРТАЮЧИХСЯ ГРЕБНИХ ГВИНТІВ

Розглядаються недоліки сучасної теорії повітряно-реактивних двигунів, які пов'язані з помилковою теоремою о підйомній силі продуваемого профілю, яку професор М. Є. Жуковський вивів у 1912 році у своїй статті «Вихревая теория гребного винта».

**Ключові слова:** кінематичний аналіз, супутнообертаючі гребні гвинти, тяга і підйомна сила продуваемого профілю.

*Мамедов Борис Шамшадович, кандидат технических наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, Украина.*

*Мамедов Борис Шамшадович, кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна.*

*Mamedov Borys, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine*

УДК 621.793

**Коваленко В. И.,  
Маринин В. Г.**

## КАВИТАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ РАЗНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

Представлены экспериментальные данные по измерениям кавитационной прочности вакуумно-дуговых  $Ti$ ,  $Zr$ ,  $(Ti + Zr)N$  покрытий, полученных при различной ориентации поверхности подложек, на которые осаждают покрытие относительно плоскости катода, эжектирующего металлическую плазму. Результаты исследований показали, что кавитационная стойкость, микротвердость, абразивная стойкость вакуумно-дуговых титановых, циркониевых и системы  $Ti$ - $Zr$  покрытий зависят нелинейным образом от величины угла, образованного поверхностями подложки и катода.

**Ключевые слова:** вакуумные дуговые покрытия, титан, цирконий, стойкость, кавитация, сопротивление, абразивный износ

## 1. Введение

В работе [1] показано, что основными факторами, обуславливающими износ энергетического оборудования, в частности оборудования пароводяного тракта ТЭС и АЭС, являются кавитация, высокоскоростные потоки влаги и абразивных частиц. Для уменьшения износа используют активные и пассивные методы защиты. Первый метод включает конструктивные и организационные работы, а второй базируется на применении материалов, обладающих повышенной износостойкостью. В настоящее время большинство работ проводится по второму направлению. При этом исследования направлены на изменение поверхностных свойств используемых материалов с целью их повышения посредством применения химико-термической обработки [2] или нанесения защитных покрытий [3].

Нанесение покрытий на поверхности деталей может осуществляться различными способами, однако наиболее эффективным, как показано в работе [3], является ионно-плазменный с применением вакуумного дугового разряда (ВДР). При реализации технологии с ВДР имеется возможность получать комбинированные покрытия на основе нитридов, карбидов, боридов различных металлов. Такие покрытия используются для решения различных технических задач, в том числе и для защиты некоторых видов энергетического оборудования от воздействия кавитации, абразивных частиц и коррозии [4, 5, 8–10].

## 2. Анализ последних публикаций

В работе [3] приведено описание источников металлической плазмы для нанесения покрытий с применением ВДР. Представлены данные о пространственном распределении составляющих плазменных потоков, генерируемых катодами этих источников. При этом преимущественно исследованы покрытия, осажденные на подложки, установленные параллельно поверхности катода на некотором расстоянии от него на линии, проходящей через его центр и являющейся осью вакуумной камеры либо осажденные на подложки, установленные на фиксированном расстоянии перпендикулярно радиус-вектору из центра катода. Получены данные по микротвердости и плотности конденсатов осажденных из Ti, Mo, Al в высоком вакууме. Ряд других характеристик таких покрытий приведены в работах [4, 6]. Однако данные о механических характеристиках покрытий полученных при произвольном расположении подложек в пространстве перед катодом практически отсутствуют, в частности, отсутствуют данные о прочности покрытий при воздействии кавитации, износе жестко закрепленными абразивными частицами, микротвердости. Перечисленные и ряд других характеристик, например, коррозионная стойкость, являются важными свойствами покрытий, определяющими возможность их применения в энергетическом машиностроении.

## 3. Цель работы

Получение данных о кавитационной и абразивной стойкости вакуумно-дуговых покрытий, осаждаемых на подложки с различной пространственной ориентацией относительно поверхности катода ВДР, эжектирующего металлическую плазму.

## 4. Материалы, оборудование и методы исследования

Покрытия для исследований получены на установке типа «Булат». В качестве катода ВДР использовали титан марки ВТ1-0, кальциетермический цирконий (ТУ 05.50.115-91).

Эрозионную стойкость образцов при воздействии кавитации измеряли на установке, описанной в работе [7]. Для создания кавитационной зоны использованы ультразвуковые волны. Сигнал от генератора УЗ-колебаний подается на магнитострикционный преобразователь, который механически соединен с концентратором экспоненциального профиля. Под торцевой поверхностью концентратора, расположенного в сосуде с водой, формируется зона с развитой кавитацией. В этой зоне на расстоянии 0,55 мм от торцевой поверхности концентратора устанавливали образцы исследуемых покрытий. Амплитуда колебаний торцевой поверхности концентратора составляет  $30 \pm 2$  мкм, а частота — 20 кГц. Эрозию образцов измеряли гравиметрическим методом. Точность измерения весовых потерь  $\pm 0,015$  мг. По экспериментальным данным строили кинетические кривые разрушения материала образцов. Определяли среднюю скорость разрушения покрытий делением весовых потерь на величину времени экспозиции образца в условиях воздействия кавитации.

Абразивный износ измеряли по схеме плоскость — диск. При испытании покрытий их наносили на плоскую поверхность, а диск изготовляли из материала с жестко закрепленными абразивными зёрнами. Скорость движения поверхности диска, которая контактирует с покрытием, равна 4,38 м/с при нагружении образца с покрытием 2,2 Н. Измеряли массовые потери покрытия за фиксированный промежуток времени. Микротвердость образцов измеряли на приборе ПМТ-3.

Для получения покрытий вакуумную камеру откачивали до остаточного давления  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па. В процессе нанесения покрытий давление изменялось в пределах от  $1,33 \cdot 10^{-3}$  до  $5 \dots 6 \cdot 10^{-3}$  Па. Подложки изготовляли из сталей 1X18H10T и 15X11MФ. Ток дугового разряда изменяли в интервале от 65 до 135 А. На подложку подавали стационарный отрицательный потенциал от 100 до 200 В. Структуру покрытий изучали на металлографических шлифах при помощи световой микроскопии. Рентгеноструктурные исследования проведены на дифрактометре ДРОН-3.

## 5. Экспериментальные результаты

Покрытия получены на подложках установленных вдоль линии перпендикулярной оси вакуумной камеры на различных расстояниях от оси ( $l$ ). Плоскости подложек и катода параллельны при осаждении Ti, Zr покрытий и составляют угол  $45^\circ$  с каждым из катодов при формировании (Ti + Zr)N покрытий. Титановые и циркониевые покрытия наносили при токе дугового разряда  $I_d = 100$  А и отрицательном потенциале на подложке  $U = 100$  В, а комбинированное покрытие (Ti + Zr)N при  $I_d = 90$  А каждого катода и потенциале 200 В. Результаты приведенных толщин покрытия ( $\eta$ ), микротвердости ( $H_\mu$ ), кавитационной ( $Z_k$ ) и абразивной ( $Z_a$ ) стойкостей при различных  $l$  представлены в табл. 1

Таблица 1

Характеристики титановых и циркониевых покрытий

Ti					Zr				
к	0	0,15	0,31	0,46	к	0	0,15	0,31	0,46
$\eta$	1	0,89	0,71	0,56	$\eta$	1	0,88	0,76	0,58
$H_{\mu}$	1	1,06	1,1	1,2	$H_{\mu}$	1	1	1,06	1,08
$Z_{\kappa}$	1	1,28	1,7	1,4	$Z_{\kappa}$	1	1,14	1,23	1,55
$Z_{\alpha}$	1	1,07	1,4	2,93	$Z_{\alpha}$	1	1,08	2,47	1,08

относительно тех же характеристик покрытия, которые сформированы на оси системы.

Данные табл. 1 показывают, что при возрастании параметра  $k = l/L_0$  до значений 0,46 ( $L_0$  – расстояние от катода до образца расположенное на оси) толщина покрытий за фиксированный промежуток времени уменьшается практически в 2 раза. Микротвердость как Ti, так и Zr покрытий незначительно возрастает, что обусловлено изменением соотношения между ионной составляющей и количеством нейтрального газа в зоне осаждения покрытия. Наблюдается увеличение кавитационной стойкости Zr – покрытий более чем на 50 %. При этом кавитационная стойкость Ti покрытий при  $k = 0,31$  имеет максимум с последующим уменьшением значения до 0,82 от максимального, а у циркониевых покрытий аналогичным образом изменяется абразивная стойкость. Абразивная стойкость Ti покрытий возрастает практически в 3 раза.

Результаты исследования свойств Ti покрытий нанесенных на подложки, поверхности которых расположены под углом  $45^\circ$  к поверхности катода, представлены в табл. 2. Подложки размещены на различных расстояниях от оси вакуумной камеры ( $l$ ) вдоль линии, перпендикулярной к ней. В табл. 2 также приведены данные для покрытий, полученных при одновременном осаждении на подложку двух эрозионных потоков плазмы из катодов ВДР, которые установлены на одинаковом расстоянии каждый под углом  $45^\circ$  к подложке.

Параметры осаждения покрытий: давление  $2 \cdot 10^{-3}$  Па, ток дуги 100 А, отрицательный потенциал на подложке 100 В. Данные табл. 2 для Ti покрытий показывают, что с ростом  $k$  толщина покрытий (скорость нанесения) уменьшается. При  $k = 0,43$  она на 30 % меньше по

сравнению с вариантом  $k = 0$ . Сравнение этой зависимости с данными табл. 1 показывают, что в этом случае имеет место большая скорость осаждения по сравнению к осаждению на подложки параллельные поверхности катода. Микротвердость незначительно возрастает, а кавитационная стойкость возрастает на ~ 50 %. Абразивная стойкость во всем интервале меньше стойкости при  $k = 0$ . Для комбинированного покрытия Ti + Zr отличие по толщине не превышающее 10 % наблюдается до расстояния от оси вакуумной камеры около 100 мм, что существенно больше по сравнению с осаждением только Ti покрытия. Микротвердость с точностью до ошибки измерения на этом интервале одинакова, наблюдаются незначительные увеличение кавитационной стойкости и уменьшение абразивной стойкости.

Влияние давления азота на свойства комбинированных покрытий представлены в табл. 3. Покрытия получены при давлении азота  $p_1 = 3,5 \cdot 10^{-2}$  и  $p_2 = 6 \cdot 10^{-1}$  Па, токе дугового разряда каждого из катодов 90 А и стационарном отрицательном потенциале на подложке 200 В.

Данные табл. 3 показывают, что при давлении  $p_1$  линейный размер (радиус) зоны одинаковой (с точностью 10 %) толщины покрытия увеличивается в 1,36 раза по сравнению с зоной формирующейся при давлении  $p_2$ . Кавитационная стойкость этих покрытий уменьшается к границе зоны практически в 2 раза по отношению к стойкости этих покрытий на оси системы. Для покрытий полученных при  $p_2$  наблюдается увеличение кавитационной стойкости в 2,33 раза значений  $k = 0,25$  с последующим уменьшением.

Исследования структуры покрытий системы Ti-Zr-N показали, что на рентгенограммах наблюдаются дифрак-

Таблица 2

Характеристики титанового и комбинированного покрытий

Ti							Ti + Zr						
к	0	0,086	0,17	0,25	0,34	0,43	к	0	0,083	0,17	0,25	0,35	0,41
$\eta$	1	0,84	0,8	0,78	0,76	0,7	$\eta$	1	0,99	0,97	0,91	0,83	0,76
$H_{\mu}$	1	0,98	1	1,05	1,07	1,17	$H_{\mu}$	1	1,06	1,03	1,25	1,05	1
$Z_{\kappa}$	1	1,45	1,28	1,32	1,56	1,58	$Z_{\kappa}$	1	1,21	1,21	1,19	1,19	1,11
$Z_{\alpha}$	1	0,78	0,76	0,86	0,94	1,07	$Z_{\alpha}$	1	0,74	0,8	1,12	0,95	0,97

Таблица 3

Свойства комбинированных покрытий (Ti + Zr)N

$p_1 = 3,5 \cdot 10^{-2}$ Па							$p_2 = 0,6$ Па						
к	0	0,083	0,17	0,25	0,34	0,42	к	0	0,083	0,17	0,25	0,34	0,42
$\eta$	1	0,99	0,95	0,94	0,89	0,8	$\eta$	1	0,97	0,9	0,88	0,78	0,68
$Z_{\kappa}$	1	0,84	0,41	0,43	0,48	0,52	$Z_{\kappa}$	1	1,44	1,96	2,33	1,7	1,53

ционные максимумы, отвечающие структуре нитридов с кристаллической решеткой типа NaCl. Рефлексы (111) и (222) расположены между соответствующими рефлексами от моонитридов TiN и ZrN. Параметр кристаллической решетки изменяется с изменением плотности ионного тока и давления азота. При давлении  $p_1$  получено значение  $a = 4,520 \text{ \AA}$ , а при  $p_2 = 4,500 \text{ \AA}$ . Наблюдается увеличение областей когерентного рассеивания в 1,2 раза у покрытий, полученных при  $p_2$  по сравнению с осажденными при  $p_1$ .

## 6. Выводы

Результаты исследований показали, что кавитационная стойкость, микротвердость, абразивная стойкость вакуумно-дуговых титановых, циркониевых и системы Ti-Zr покрытий зависит нелинейным образом от величины угла, образованного поверхностями подложки и катода ВДР. Формирование покрытий системы Ti-Zr обеспечивает увеличение области покрытия с одинаковыми свойствами. При этом с увеличением давления в вакуумной камере размер этой области уменьшается.

## Литература

1. Бараненко, В. И. Решение проблемы снижения эрозионно-коррозионного оборудования и трубопроводов на зарубежных и отечественных АЭС [Текст] / В. И. Бараненко, Ю. А. Янченко // Теплоэнергетика. — 2007. — № 5. — С. 12–19.
2. Борисенко, Г. В. Химико-термическая обработка металлов и сплавов [Текст] : справочник / Г. В. Борисенко, Л. А. Васильев, А. Г. Ворошнин и др. — М.: Металлургия, 1981. — 424 с.
3. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование [Текст] / И. И. Аксенов, А. А. Андреев, В. А. Белоус, В. Е. Стрельницкий, В. М. Хороших. — К.: Наукова думка. — 2012. — 728 с.
4. Маринин, В. Г. Ерозія вакуумно-дугових титанових покриттів при дії кавітації [Текст] / В. Г. Маринін, В. І. Коваленко, Л. І. Мартиненко, Ю. М. Соловйченко // Препринт ХФТИ 2008-2-Харків: ННЦ ХФТИ. — 2008. — 22 с.
5. Cheng, Y. H. Mechanical and tribological properties of nanocomposite Ti-Si coatings [Текст] / Y. H. Cheng, T. Browne, B. Heckerman, E. I. Meletis // Surface and Coatings Technology. — 2010. — № 204. — pp. 2123–2129.
6. Marinin, V. G. Cavitation, Erosion of Ti coating produced by the vacuum arc method [Текст] / V. G. Marinin, V. I. Kovalenko, N. S. Lomino // XIX ISDEV 2000, Xi'an china. — V. 1. — pp. 315–317.
7. Коваленко, В. І. Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікроударному діянні [Текст] / В. І. Коваленко, В. Г. Маринін // Вопросы атомной науки и техники. сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. — 1998.— № 5(71) — С. 83–89.
8. Коваленко, В. И. Прочность поверхностных слоев циркониевых сплавов и вакуумно-дуговых покрытий при микроударном воздействии [Текст] / В. И. Коваленко, В. Г. Маринин // Вопросы атомной науки и техники. сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. — 2008. — № 1. — С. 77–80.
9. Ажажа, В. М. Синтез, структура, субструктура, остаточные напряжения и отдельные физические свойства Ti-Zr-Ni-квазикристаллов [Текст] / В. М. Ажажа, С. М. Дуб, А. Н. Гриб и др. // Вісник Харківського національного університету. Сер. Фізика. — 2006. — № 9, № 739. — С. 103–107.
10. Аксенов И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И. И. Аксенов. — Харьков: ННЦ ХФТИ. — 2005. — 212 с.

## КАВИТАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ПОКРИТТІВ, СФОРМОВАНИХ НА ПІДКЛАДКАХ З РІЗНОЮ ОРІЄНТАЦІЄЮ

Подано експериментальні дані по вимірюванням кавітаційної міцності вакуумно-дугових Ti, Zr, (Ti + Zr)N покриттів, які одержано на поверхні підкладок з різною просторовою орієнтацією відносно еродуючої поверхні катода. Результати досліджень показали, що кавітаційна міцність, микротвердість та абразивна стійкість вакуумно-дугових, титанових, цирконієвих і системи Ti-Zr покриттів нелінійно залежать від величини кута, що створюється поверхніми підкладки і катода.

**Ключові слова:** вакуумно-дугові покриття, титан, цирконій, стійкість, кавітація, опір, абразивний знос.

*Коваленко Володимир Іванович, молодший науковий співробітник, Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій, Відділ інтенсивних вакуумно-плазмових технологій, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Україна.*

*Маринин Володимир Григорьевич, кандидат фізико-математических наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій, Відділ інтенсивних вакуумно-плазмових технологій, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Україна, e-mail: marinin@kipt.kharkov.ua.*

*Коваленко Володимир Іванович, молодший науковий співробітник, Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій, Відділ інтенсивних вакуумно-плазмових технологій, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Україна.*

*Маринин Володимир Григорьевич, кандидат фізико-математических наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій, Відділ інтенсивних вакуумно-плазмових технологій, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Україна.*

*Kovalenko Vladimir, Institute of solid-state physics, materials science and technologies, National Science Center «Kharkov Institute of Physics and Technology», Ukraine.*

*Marinin Vladimir, Institute of solid-state physics, materials science and technologies, National Science Center «Kharkov Institute of Physics and Technology», Ukraine, e-mail: marinin@kipt.kharkov.ua*