

9. Pingping, Z. Viscosity behavior of incompatible poly(vinyl chloride) / polystyrene blends in various solvents [Text] / Z. Pingping, Y. Haiyang, Z. Yiming. // European Polymer Journal. – 1999. – Vol. 35. Issue 5. – P. 915–921. doi: 10.1016/s0014-3057(98)00064-0
10. Levytskyj, V. Influence of the silicate modifier nature on the structure and properties of polycapraamide [Text] / V. Levytskyj, V. Kochubei, A. Gancho // Chemistry and Chemical Technology. – 2013. – Vol. 7, Issue 2. – P. 169–172.
11. Ганчо, А. В. Структура і властивості композитів на основі поліпропілену та полімер-силікатного модифікатора [Текст] / А. В. Ганчо, В. Є. Левицький, А. С. Масюк // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – Т. 5, № 6 (53). – С. 54–57. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/1250/1152>
12. Stipanelov Vrandečić, N. Effect of Ca/Zn stabiliser on thermal degradation of poly(vinyl chloride)/chlorinated polyethylene blends [Text] / N. Stipanelov Vrandečić, I. Klarić, U. Roje // Polymer Degradation and Stability. – 2001. – Vol. 74, Issue 2. – P. 203–212. doi: 10.1016/s0141-3910(01)00013-1
13. Ганчо, А. В. Фізико-хімічні закономірності формування полівінілпіролідон-силікатних наноконпозиційних матеріалів [Текст] / А. В. Ганчо, В. Є. Левицький, О. В. Суберляк // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – № 6. – С. 55–59.
14. Tenkayala, S. R. Synthesis and characterization of poly(vinyl alcohol) / water glass (SiO₂) nanohybrids via sol-gel process [Text] / S. R. Tenkayala, M. C. S. Subha, V. R. Gorla, Y. H. Kim, C. R. Kashay, V. P. Chalapati // Journal of Applied Polymer Science. – 2010. – Vol. 117, Issue 6. – P. 3533–3538. doi: 10.1002/app.32258

Подано експериментальні дані вимірювання стійкості покриттів, які одержано на сталі 15X11МФ за допомогою плазмотронного, вакуумно-дугового, іонно- та атомно-іонного методів формування. Одержано кінетичні криві руйнування покриттів. Встановлено, що покриття, які одержано іонно-плазмовим методом мають більшу стійкість до дії кавітації порівняно із сталлю. Вивчено характер ерозії поверхні покриттів. Встановлено взаємозв'язок між стійкістю і мікротвердістю покриттів

Ключеві слова: покриття, формування плазмотронне, електронно-іскрове, вакуумно-дугове, атомно-іонне, кавітація, стійкість, взаємозв'язок, мікротвердість

Представлены экспериментальные данные по измерениям стойкости (прочности) покрытий при воздействии ультразвуковой кавитации. Покрытия получены на образцах из нержавеющей стали 15X11МФ при использовании плазмотронного, вакуумно-дугового, атомно-ионного методов осаждения. Получены кинетические кривые покрытий и характер изменения их поверхности при воздействии кавитации. Установлена высокая стойкость ионно-плазменных покрытий и ее взаимосвязь с микротвердостью

Ключевые слова: покрытия, плазмотронное осаждение, электроискровое, вакуумно-дуговое, атомно-ионное, кавитация, стойкость, взаимосвязь, микротвердость

УДК 621.793

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.29576

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ ПРИ МИКРОУДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. Н. ВоеводинЧлен-корреспондент АН Украины,
профессор, директор**

E-mail: voev@kipt.kharkov.ua

Г. Н. КартазовКандидат технических наук, старший научный
сотрудник, руководитель отдела*

E-mail: kartmazov@kipt.kharkov.ua

В. Г. МарининКандидат физико-математических наук, доцент,
старший научный сотрудник*

E-mail: marinin@kipt.kharkov.ua

*Отдел интенсивных
вакуумно-плазменных технологий****Институт физики твердого тела,
материаловедения и технологий

Национальный научный центр

«Харьковский физико-технический институт»

ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108

1. Введение

Опыт эксплуатации оборудования на АЭС и ТЭС показывает, что ряд его элементов работает в условиях микроударного воздействия, обусловленного высокоскоростными потоками капель воды, твердых частиц и кавитацией. При этом в поверхностных слоях материа-

ла возникают локальные напряжения, изменяющиеся во времени с большой скоростью и достигающие значительных, сравнимых по величине с пределом прочности материала, в частности, стали 15X11МФ (σ_T^{20} ~700 МПа). Результатом этого воздействия является интенсивное разрушение (эрозия) поверхностных слоев конструктивных материалов, что определяет эксплуатацию

онную долговечность оборудования. К числу таких элементов относятся рабочие лопатки последних ступеней части низкого давления паровых турбин, на входную кромку которых воздействуют потоки капель влаги со скоростями более нескольких сотен метров за секунду. В практическом плане борьбы с возникающей эрозией используют два пути: активный, включающий конструкторско-технические разработки, и пассивный, направленный на замедление эрозии материала вследствие модификации его поверхности, в частности, в результате нанесения покрытий.

2. Анализ литературных данных

В связи с тем, что в настоящее время отсутствуют универсальные методы получения покрытий, которые удовлетворяли бы различным постоянно возрастающим требованиям к их эксплуатации, возникает необходимость в каждом конкретном случае выбирать как материал для создания покрытий, так и методы их формирования. В работах [1–6] представлены наиболее широко используемые методы создания покрытий и описан ряд их свойств. В монографии [1] рассматривается способ создания на сталях защитного слоя посредством вакуумного активированного насыщения. Получены боридные, карборидные, Nd-Fe-B покрытия, исследованы их коррозионные свойства, жаростойкость. Представлены свойства комплексных покрытий на углерод-углеродных материалах. Комплексные покрытия состоят из SiC, $(W_xN_y)Si_2$ и HfB₂. Покрытия толщиной около 150 мкм наносили при температуре около 1500..1600 К в течение 15 часов. Высокие температуры формирования покрытий затрудняют использование этих методов. В монографии [2] описаны пространственно временные условия образования покрытий. Изучены их структура и механические характеристики. Для прочного сцепления напыляемых частиц с подложкой необходим ее подогрев до температур около 800 К. Кроме того, данные об эрозии таких покрытий при воздействии кавитации единичны. В работах [3–6] рассмотрены физические процессы формирования эрозионных потоков из катодов вакуумного дугового разряда, использование их для нанесения покрытий и описаны элементы оборудования. Получены следующие покрытия TiCN, Mo(SN), TiMo(SN), TiN-CrN, а также сверхтвердые покрытия с применением ионной имплантации (твердость до 490 ГПа) и нанокompозитные покрытия. Исследованы структура покрытий, фазовый состав, твердость, прочность на разрыв, трибологические свойства. Изучены многокомпонентные нитридные покрытия на основе Ti, Zr, Nb [5, 6]. При этом эрозия покрытий в условиях микроударного воздействия не исследовалась. Этому вопросу посвящены работы [7], в которых получены первичные данные по эрозии некоторых вакуумно-дуговых покрытий.

Таким образом, имеющиеся литературные данные не содержат полной картины об эрозии при микроударном воздействии, обусловленном кавитацией, покрытий, полученных различными методами осаждения, что вызывает необходимость проведения соответствующих исследований. Полученные данные будут использованы для создания с более высокими

свойствами защитных покрытий на элементах энергетического оборудования, в частности, паровых турбин АЭС и ТЭС, что позволит повысить их производительность за счет увеличения срока эксплуатации.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является выбор метода формирования покрытий и получение данных о величине их эрозии при воздействии кавитации для установления наиболее эффективного метода формирования, обеспечивающего их высокую стойкость (малую эрозию).

Задачи работы:

- получить покрытие с использованием плазмотронного, детонационного, вакуумно-дугового разряда (ВДР), атомно-ионного (АИР) методов формирования;
- измерить зависимость величины эрозии (разрушения) покрытий от времени воздействия кавитации;
- определить стойкость покрытий и установить их взаимосвязь с микротвердостью.

4. Оборудование и методика экспериментальных исследований

Стойкость материала к микроударному нагружению определяли на стенде, разработанном в ННЦ ХФТИ, в котором кавитационная зона создавалась в воде ультразвуковым излучателем, параметры которого представлены в работе [9]. Величину эрозии измеряли по убыли веса образцов после определенного времени воздействия кавитации. Экспериментальные данные представляли в виде кинетических кривых, для которых характерно наличие начального участка, когда разрушение мало, и участка с максимальной квазипостоянной скоростью. На этом участке кинетической кривой определяли скорость разрушения (V_i) образца и соотносили ее со скоростью разрушения эталона $V_0 = 1$ мкм/час, или 1 мг/час и, соответственно, вычисляли стойкости Z_h и Z_m . Другие характеристики массивных образцов и покрытий определяли, применяя стандартные методики.

Исследованы покрытия, полученные с использованием широкого спектра способов их формирования, в частности, плазмотронного, детонационного, электроискрового, восстановлением химических соединений на нагретой поверхности, ионно-плазменного, релятируемого с применением вакуумно-дугового разряда (ВДР), и по способу атомно-ионного распыления (АИР).

Плазмотронные покрытия получены на установке УПУ-3 с плазменной горелкой УМП-5 в режиме расхода плазмообразующего газа аргона 5 л/мин, силы разрядного тока 450 А, напряжения 35 В и расстояния от плазменной горелки до образца 150 мм. Распыляли проволоку марки X20H80 диаметром 0,8 мм и порошок марки 1X18H9T со средним диаметром частиц 100 мкм.

Электроискровые покрытия наносили на установке ИАС-2М при силе разрядного тока 60 А и напряжении 30 В. Детонационные покрытия наносили используя детонационную смесь 50 % O₂ + 50 % C₂H₂ при навеске порошка ~80 мг, длине ствола 1700 мм, диаметре 16 мм. Температура взрыва 3100 °С, скорость детонации 2900 м/с.

Ионно-плазменные покрытия получены осаждением эрозионной плазмы, генерируемой катодом вакуумно-дугового разряда. После достижения в вакуумной камере давления, близкого к $2,66 \cdot 10^{-3}$ Па, проводили напуск реакционного газа до давления, которое в зависимости от типа покрытия изменяли в интервале от $1,33 \cdot 10^{-2}$ до 1,33 Па. Силу тока дугового разряда в зависимости от материала катода устанавливали в интервале от 65 до 130 А, а отрицательный потенциал на образце изменяли до 200 В.

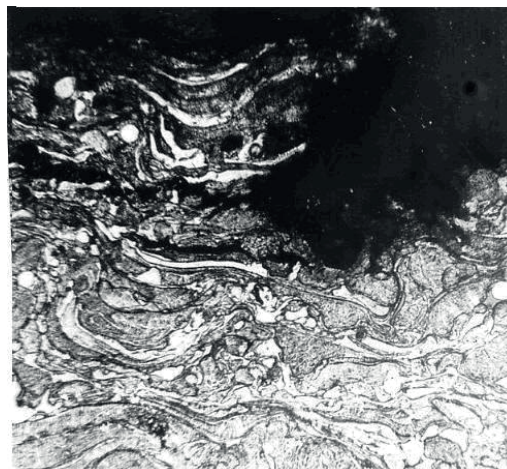
Метод АИР, представляющий собой новый ионно-плазменный способ защиты изделий, заключается в возможности нанесения нано- и микрокристаллических металл-металлоидных и керамических покрытий толщиной до 1 мм. Метод реализуется посредством испарения острофокусным сканирующим электронным лучом силой тока до 1 А и напряжением до 20 кВ в вакуумной камере материала для нанесения покрытий с последующей ионизацией паров электрическим разрядом постоянного или высокочастотного тока. При этом осуществляется химическое активирование введением паров галогенидов металла и/или аморфизатора. Конденсация плазмы производится на подложку при заданных температуре и электрическом потенциале.

Исследованы покрытия, полученные на основе металлов Ti, Cr, Ni, Nb.

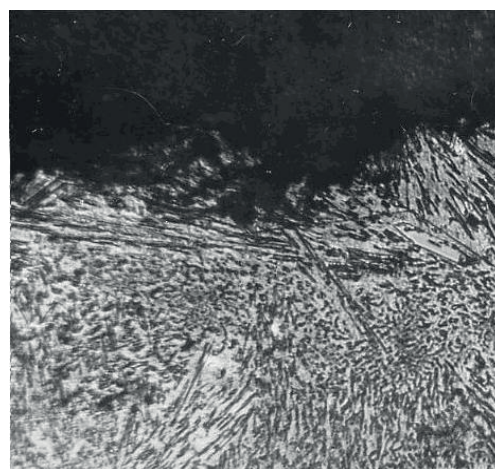
5. Экспериментальные данные и их обсуждение

Исследование покрытий, которые получали плазмотронным, детонационным и электроискровым способами, показали, что они имеют слоистую структуру, которая обусловлена дискретностью поступления материала для формирования покрытий. Последовательная укладка частиц через определенный промежуток времени приводит к созданию промежуточных хрупких слоев между ними. В результате имеет место низкая прочность межслойных границ и, кроме того, значительная пористость покрытий. При воздействии кавитации разрушение таких покрытий начинается с распространения трещин вдоль границ между слоями покрытий с последующим удалением значительных фрагментов, что иллюстрирует рис. 1, а, на котором приведена микрофотография части зоны разрушения покрытия (поперечный шлиф). В левой части видно разрушение в результате удаления слоев покрытия. Для сравнения разрушений покрытий и литого материала на рис. 1, б приведена микрофотография эрозии последнего (нихром).

Как видно, литой материал разрушается вследствие образования большого числа микрократеров, превращающихся в более глубокие, которые сливаются и обуславливают унос материала. В соответствии со слоистой структурой покрытий изменяется и вид кинетических кривых, характеризующих их разрушение при кавитационном воздействии. Рис. 2 иллюстрирует это положение кинетическими кривыми разрушения детонационных покрытий из порошка стали 1Х18Н9, электроискрового покрытия из сплава Т15К6. Для сравнения на рисунке приведена кинетическая кривая разрушения массивного образца стали 1Х18Н9.



а



б

Рис. 1. Микрофотография зоны разрушения покрытия: а – плазмотронного покрытия (×200), время воздействия кавитации 120 с; б – литого материала (×500), время воздействия кавитации 3,6 с

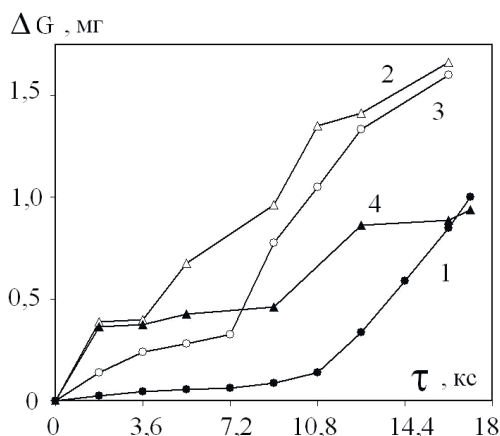


Рис. 2. Кинетические кривые разрушения при воздействии кавитации: 1 – массивный образец стали 1Х18Н9; 2, 3 – детонационные покрытия того же кинетического состава, полученные при различных скоростях детонации; 4 – электроискровое покрытие из твердого сплава Т15К6

Данные рисунка показывают, что в отличие от массивных образцов стали, покрытие разрушается неравномерно. Абсолютные значения стойкости, вычисленные по кинетическим кривым, аналогичным представленным на рисунке, близки к значениям 0,1 от стойкости эталона.

Исследование покрытий, полученных методом ВДР, проведено на образцах, полученных при осаждении из эрозионной плазмы, генерируемой катодами из титана, ниобия, хрома. Выбор металлов для катода обусловлен анализом полученных ранее данных по кавитационной стойкости технически чистых металлов и некоторых сплавов [3]. Установлено, что практически все металлы не обеспечивают кавитационной стойкости, превышающей стойкость стали 15X11МФ. Однако соединения типа нитридов, карбидов являются перспективными, в частности, из перечисленных металлов. Исследования на их основе покрытий, полученных методом ВДР, показали, что они имеют столбчатую структуру с направлением роста, изменяющимся от (111) до (200) в зависимости от параметров процесса осаждения, которые также определяют и механические характеристики покрытий. На рис. 3 приведено изменение механических свойств покрытий (микротвердости, стойкости при воздействии кавитации), полученных из Ti- катода при различных давлениях азота в вакуумной камере.

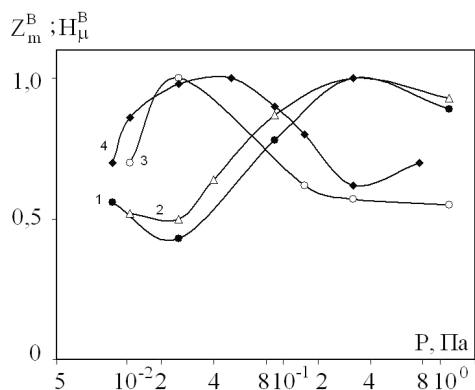


Рис. 3. Зависимость относительных кавитационных стойкостей (Z_m^B) и микротвердостей (H_μ^B) покрытий, осажденных при различных давлениях азота в вакуумной камере: 1, 2 – Z_m^B при отрицательном потенциале на образце $U=200$ В и тока дуги 100 и 60 А, соответственно; 3, 4 – H_μ^B для покрытий соответственно 1, 2

На рис. 3 индекс «В» у величин Z_m^B, H_μ^B означает, что они определены относительно их максимальных значений, измеренных в исследованном интервале давлений азота. Важным является тот факт, что при максимальных значениях H_μ в интервале P от 0,01 до 0,1 Па кавитационная стойкость Z_m принимает минимальные значения, а в области значений $P \sim 0,3...0,6$ Па стойкость принимает максимальные значения при минимальных величинах H_μ . Полученные зависимости, как показали исследования, обусловлены структурно-фазовым состоянием покрытий. При давлении в вакуумной камере, меньшем 0,01 Па, покрытия представляют собой твердый раствор атомов внедрения в α -Ti, в интервале давления от 0,01 до 0,1 Па фазовый со-

став изменяется до α -Ti+Ti₂N+TiN, а в последующем – до TiN стехиометрического состава. Эти покрытия обладают максимальной кавитационной стойкостью.

Исследования свойств Nb-N покрытий, полученных методом ВДР, показали, что по сравнению с Ti-N покрытиями они имеют несколько отличные зависимости микротвердости и кавитационной стойкости от давления азота (рис. 4).

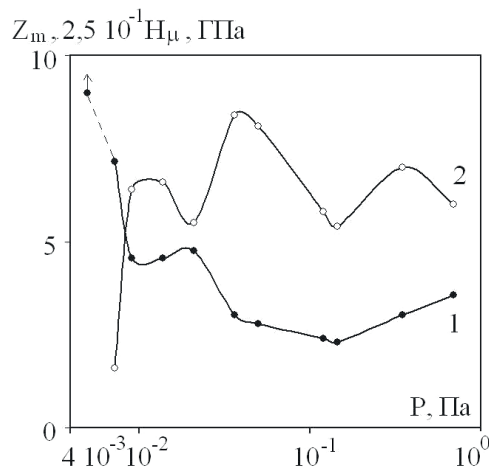


Рис. 4. Зависимость кавитационной стойкости (1) и микротвердости (2) покрытий Nb-N от давления азота, при котором они осаждаются

Разница в ходе кривых обусловлена наличием в системе Nb-N нескольких фаз, которые формируются при различных давлениях азота. Полученные экспериментальные данные для покрытий с учетом диаграммы состояния системы Nb-N показывают, что до давления азота около 0,014 Па покрытия представляют собой твердые растворы в ниобиевой матрице атомов азота и в небольшом количестве атомов кислорода и углерода. При этом высокая растворимость азота обуславливает высокие значения микротвердости покрытий и повышенную скорость их разрушения. В интервале давлений от 0,02 до 0,2 Па покрытие состоит преимущественно из фазы Nb₂N. Дальнейшее увеличение давления более 0,2 Па приводит к формированию γ -фазы (NbN_x) при $x > 0,7$. Положение границ зависит от технологических параметров, при которых формируется покрытие (тока дуги, величины отрицательного потенциала на образце). Максимальное значение кавитационной стойкости получено при давлении азота менее 0,01 Па.

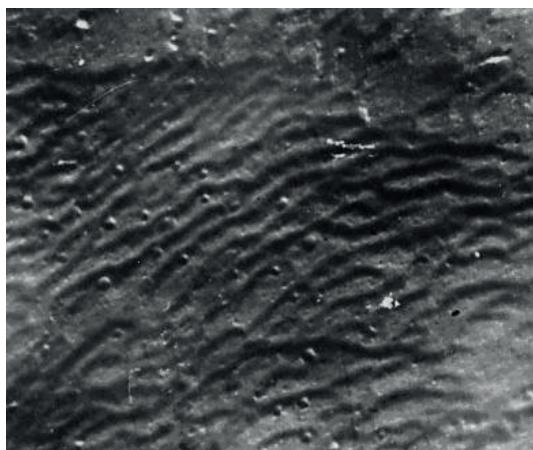
Металл-углеродные покрытия наносили на установку типа АИР. Хром испаряли в вакууме ($10^{-3}...10^{-2}$) Па электронным лучом мощностью до 12 kVA. Хром легировали углеродом путем напуска C₇H₈. В потоке паров возбуждали плазму высокочастотным электромагнитным полем (440 kHz), которая конденсировалась в виде покрытия на образцах, поддерживаемых под отрицательным электрическим потенциалом (250 V). Стационарные условия испарения поддерживали путем непрерывной механической подачи испаряемого штабика диаметром 18 мм и высотой 100 мм по мере его расходования.

Содержание углерода в покрытиях устанавливали активационным анализом с использованием ускорен-

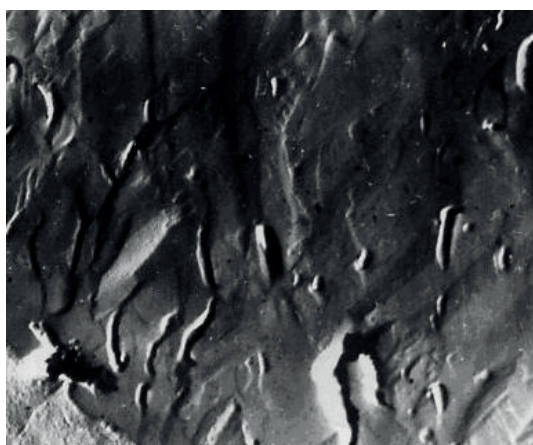
ных до энергии 700 keV протонов, возбуждавших ядерную реакцию $^{12}\text{C}(\text{P}, \gamma)^{13}\text{N}$. Аннигиляционные γ -кванты распада ядра ^{13}N регистрировали в режиме совпадения с помощью детектора $\text{NaJ}(\text{TI})$ и электронного спектрометрического тракта. При токе пучка протонов 3...5 μA на образец-мишень предел обнаружения составлял $10^{-3}\%$ ат.

Структурно-фазовое состояние покрытий изучали методами рентгеновской дифрактометрии, трансмиссионной электронной микроскопии, а также стандартными металлографическими.

Исследования показали, что небольшая добавка углерода в хромовое покрытие приводит к измельчению фрагментов структуры и подавлению формирования огранки кристаллов на поверхности роста. При увеличении концентрации углерода исчезает столбчатая структура, а скол приобретает бесструктурный стеклоподобный характер. На рис. 5, а представлена микрофотография, показывающая подавление формирования огранки кристаллов. Рис. 5, б иллюстрирует стеклоподобный характер структуры покрытия в плоскости роста.



а



б

Рис. 5. Микрофотография поверхности: а – роста покрытия состава Cr-18 %С, полученного при 900 К ионным осаждением в парах толуола ($\times 13000$); б – скола в направлении роста покрытия состава Cr-18 %С, полученного при 900 К ионным осаждением в парах толуола ($\times 13000$)

Покрытие Cr-18 ат. % С идентифицируется как рентгеноаморфное. Вместе с тем, применение высоко-разрешающей трансмиссионной электронной микроскопии позволило обнаружить фрагменты структуры размером 1...2 нм, по-видимому, представляющие собой микрокристаллы. С этой точки зрения рентгеноаморфные покрытия с таким размером фрагментов структуры (областей когерентного рассеяния в диапазоне 1...10 нм) следует отнести к нанокристаллическим. Чаще всего они представляют собой микрогетерогенную смесь аморфного и микрокристаллического состояний.

Для хромуглеродных покрытий, содержащих около 8 ат. % С, структурное состояние соответствует разупорядоченному пересыщенному твердому раствору со следами карбидов низшей валентности.

Количественные данные по эрозии покрытий в условиях воздействия кавитации приведены на рис. 6.

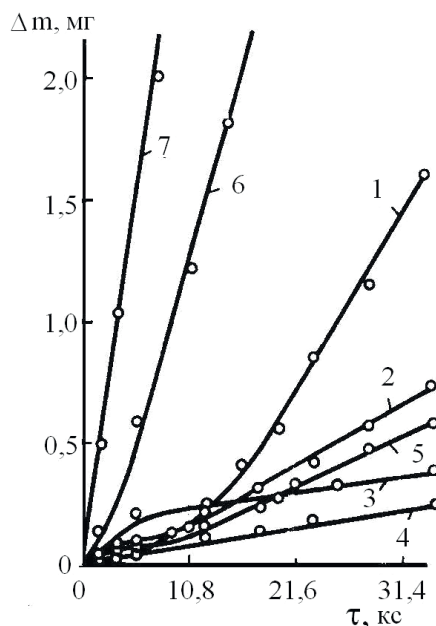


Рис. 6. Потеря массы (Δm) покрытиями в зависимости от времени действия кавитации (τ , кс). 1 – покрытие без упрочнения; 2 – 7 – покрытия после введения углерода следующей концентрации: 2,55; 4,2; 8,0; 9,1; 16,5; 36,8 ат. % соответственно

В зависимости от количества углерода, введенного в покрытие, вид кинетических кривых изменяется. При малых количествах углерода 2,55 % отчетливо наблюдается инкубационный период, что свидетельствует о пластичности покрытия. При концентрации углерода более 16,5 ат. % инкубационный период практически отсутствует и наблюдается хрупкое разрушение. Вычисленные по кинетическим кривым значения стойкости покрытий в зависимости от их микротвердости приведены на рис. 7.

Данные рис. 7 и структурно-фазовые исследования показывают, что в интервале микротвердости от 2,5 до 8...10 ГПа покрытия представляют собой твердый раствор углерода в хромовой матрице, что обуславливает достаточно высокую их стойкость. Дальнейшее увеличение количества толуола в вакуумной камере при осаждении покрытий приводит к

формированию низших карбидов хрома, повышению микротвердости покрытий и к уменьшению их стойкости по сравнению с имеющими микротвердость до 10 ГПа. Покрытия на основе хрома, осажденные методами гальваническим и ВДР при высоком вакууме без реакционного газа, имеют низкую стойкость.

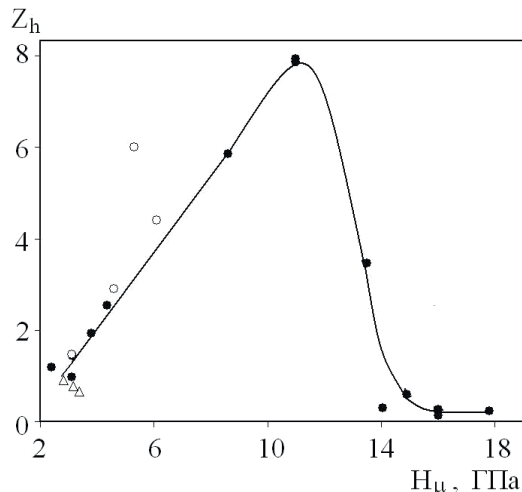


Рис. 7. Зависимость стойкости (Z_h) от микротвердости (H_μ) покрытий на основе Cr: Δ – вакуумно-дуговые, $P=4 \cdot 10^{-3}$ Па; \bullet – покрытия, полученные методом АИР: Cr ($P=4 \cdot 10^{-3}$ Па), Cr-N (конц. C=2,55...36,8 ат. %); \circ – гальванические покрытия

Экспериментальные данные показывают, что применяя метод АИР для нанесения покрытий, можно получить их стойкость (Z_h) выше стойкости закаленной ТВЧ стали 15X11МФ в 1,5...2 раза. Вакуумно-дуговые покрытия, формирующиеся из эрозивной плазмы титанового катода в вакуумной камере с азотом, при импульсной подаче потенциала на образец, как показали исследования, также обладают высокой стойкостью [1, 9].

6. Выводы

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы:

1. Покрытия со слоистой структурой, формируемые плазмотронным, детонационным, электроискровым методами осаждения обладают относительно низкой стойкостью при воздействии на них кавитации и не могут существенно защитить поверхности нержавеющей сталей.

2. Ионно-плазменные покрытия, формируемые на образцах с применением вакуумно-дугового и атомно-ионного методов при соответствующих параметрах проведения процесса осаждения, превышают в условиях воздействия кавитации стойкость нержавеющей сталей и, в частности, стали 15X11МФ.

3. Для защиты поверхностей от воздействия микроударов при кавитации рекомендуется использовать

ионно-плазменные покрытия, формируемые на основе хромуглеродного и титан-азотного взаимодействий.

4. Стойкость хромуглеродных покрытий определяется их микротвердостью.

Литература

1. Змий, В. И. Реакционно-активированная диффузия и вакуумные покрытия [Текст] / В. И. Змий, С. Г. Руденький. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. – 158 с.
2. Кудинов, В. В. Плазменные покрытия [Текст] / В. В. Кудинов. – М., «Наука», 1977. – 184 с.
3. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование [Текст] / И. И. Аксенов, А. А. Андреев, В. А. Белоус и др.; под ред. И. И. Аксенова. – НПП «Издательство “Наукова думка” НАН Украины», дизайн, 2012. – 726 с.
4. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговые покрытия [Текст] / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, С. Н. Григорьев. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. – 317 с.
5. Boxman, R. L. Structure and properties of vacuum arc deposited multi-component nitride coatings of Ti, Zr and Nb [Text] / R. L. Boxman, V. N. Zhitomirsky, I. Grinberg, L. Rapoport, S. Goldsmith, B. Z. Weiss // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 125, Issue 1-3. – P. 257–262. doi: 10.1016/s0257-8972(99)00570-8
6. Dobrzanski, L. A. Structure and properties of the TiN and Ti(CN) coatings deposited in the PVD process on the high-speed steels [Text] / L. A. Dobrzanski, M. Adamiak // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 133, Issue 1-2. – P. 50–62. doi: 10.1016/s0924-0136(02)00244-3
7. Карتماзов, Г. Н. Исследование эрозии покрытий из нитрида титана под воздействием кавитации и воздушно-абразивного потока [Текст] / Г. Н. Карتماзов, В. И. Коваленко, В. В. Кунченко, В. Г. Маринин // Вопросы атомной науки и техники. Серия ФРП и РМ. – 1998. – Вып. 5(71). – С. 71–74.
8. Коваленко, В. И. Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікро ударному діянні [Текст] / В. И. Коваленко, В. Г. Маринін // Вопросы атомной науки и техники. Серия ФРП и РМ. – 1998. – Вып. 5(71). – С. 83–85.
9. Маринін, В. Г. Покриття для захисту елементів теплоенергетичного устаткування [Текст] / В. Г. Маринін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 5, № 5(53). – С. 32–37. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/1220/1124>
10. Смыслов, А. М. Нанослойное покрытие для лопаток турбомашин из титановых сплавов [Текст] / А. М. Смыслов, А. Д. Мингажев, М. К. Смыслова и др. // Уфа: Вестник УГАТУ. Машиностроение. – 2011. – Т. 15, № 1(41). – С. 109–112.