

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК КАВІТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ТА МІКРОТВЕРДОСТІ ПОКРИТТІВ

В.Г. Маринін

*Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»,
Харків, Україна*

Подано результати експериментальних досліджень властивостей покриттів на основі Ti, Zr, Cr, Nb, сформованих при різних тисках у вакуумній камері із ерозійної плазми катодів вакуумно-дугових розрядів. Одержано дані зі стійкості покриттів за мікроударів при дії кавітації та взаємозв'язок стійкості із мікротвердістю.

ВСТУП

Відомо, що при дії кавітації на поверхню твердого тіла в зоні контакту в приповерхневих шарах виникають значні напруження, які викликають руйнування. Величина ерозії залежить від умов дії кавітації і властивостей матеріалу. Оскільки до цього часу загальної теорії руйнування не створено, то виникає необхідність в проведенні досліджень для кожного варіанту системи кавітаційна зона-матеріал. В даній роботі подано результати досліджень покриттів, які одержано переважно із ерозійних потоків із катодів вакуумно-дугових розрядів при різних тисках реакційного газу у вакуумній камері.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Кавітаційну зону, в якій розміщували зразки, створювали за допомогою ультразвукових коливань, що передавались у воду випромінювачем експоненціального профілю. Амплітуда коливань торцевої поверхні випромінювача - (30 ± 2) мкм, а частота - 20 кГц. Детальний опис установки подано в роботах [1,2]. Вагові втрати зразків за рахунок ерозії вимірювали з точністю 0,015 мг. За експериментальними даними після відповідних обчислень будували кінетичні криві в координатах «глибина руйнування – час дії кавітації». Визначали середню швидкість руйнування покриттів, за якою обчислювали їх стійкість до дії кавітації. Мікротвердість зразків вимірювали за допомогою приладу ПМТ-3 при навантаженні 0,49 та 0,98 Н. Дослідження інших характеристик покриттів описано в роботах [3,4]. Покриття наносили на установці типу «Булат» на попередньо поліровані підкладки, що виготовлені зі сталей 1X18H10T та P6M5. Катоди для вакуумного дугового розряду виготовляли із титану марки ВТ1-0, кальцієтермічного цирконію (ТУ 05.20.115-91), хрому марки ВХ-2К, ніобію. Вакуумну камеру відкачували паромасляними насосами до залишкового тиску не більше $8 \cdot 10^{-4}$ Па. Покриття наносили в умовах формування потоків металевої плазми при вихідному вакуумі $(8 \dots 14) \cdot 10^{-4}$ Па та в умовах їх взаємодії з реакційним газом. За рахунок подачі газу тиск в камері збільшували до граничних значень: 2,66; 1,33; 0,66; 0,66 Па при формуванні відповідно покриттів на основі титану, цирконію, хрому, ніобію. При нанесенні на підкладку покриттів типу MeN_x на неї подавали постійний негативний потенціал 200 В, а

вакуумні покриття одержували при значеннях негативних потенціалів, які змінювали від 0 до 200 В. Сила струму дугового розряду дорівнювала 70 і 135 А для катоду з титану, 130 А – з цирконію та ніобію, 100 А – з хрому. Температура підкладки при нанесенні покриттів типу MeN_x дорівнювала 770 К, а при формуванні вакуумних покриттів залежала від величини негативного потенціалу на підкладці і не перевищувала 850 К.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Типові криві, що репрезентують втрати маси зразків в залежності від часу дії кавітації для деяких покриттів, подано в роботах [2–6] та на рис. 1.

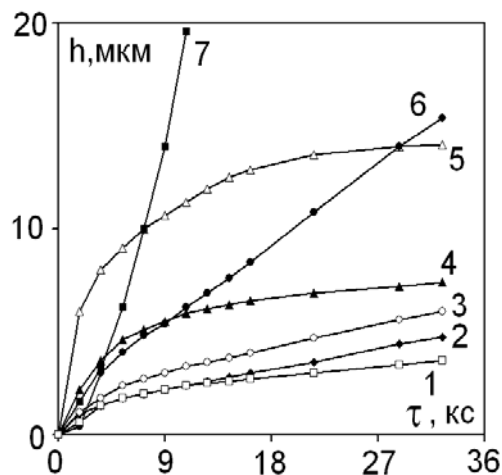


Рис. 1. Кінетичні криві ерозії зразків при кавітації.

- 1 – вакуумно-дугове покриття Nb-N;
2,3 – масивні зразки ТН20, Т15К6;
4,5,7 – електроіскрові покриття
Т15К6, ТН20, КНТ16;
6 – вакуумно-дугове покриття Nb-N

За кінетичними кривими, подібними до наведених обчислено швидкості ерозії зразків, а за ними – їх стійкості. На рис.2 подано залежності швидкості ерозії при дії кавітації, а також абразивного зносу та мікротвердості покриттів системи Nb-N від тиску азоту, при якому вони сформовані. Для порівняння наведено залежність мікротвердості Zr-N-покриттів, які одержано при різних тисках реакційного газу – азоту.

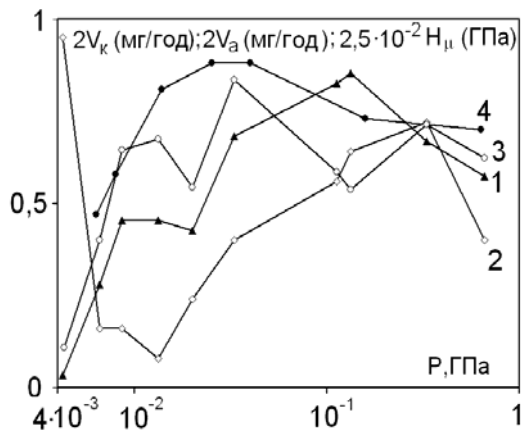


Рис.2. Залежності від тиску азоту у вакуумній камері: 1 – швидкості руйнування при кавітації (V_k); 2 – при абразивному зносі (V_a); 3,4 – мікротвердості покриттів Nb-N, Zr-N

Видно, що характер залежностей мікротвердості Nb-N- і Zr-N-покриттів від тиску азоту різний. Але, як показали дослідження, для Zr-N і Ti-N він однаковий. Різниця, яка спостерігається в ході кривих (3,4), обумовлена наявністю в системі Nb-N декількох фаз, які формуються при різних тисках азоту [7].

З урахуванням діаграми стану системи Nb-N одержані дані для Nb-N-покриттів показують, що при тискові азоту приблизно до 0,014 Па покриття однофазні і є твердим розчином в ніобієвій матриці атомів N і невеликої кількості атомів O, C із залишкової атмосфери та сформованих Nb₂N. При цьому, висока розчинність азоту обумовлює високі значення мікротвердості, підвищену швидкість руйнування при кавітації і зменшення зносу при дії абразиву. В інтервалі тиску приблизно від 0,02 до 0,2 Па покриття складається переважно із Nb₂N. При тискові, більшому від 0,2 Па, формується γ -фаза (NbN_x) при $x > 0,7$. Положення границь залежить від технологічних параметрів, при яких нанесено покриття. Приведені результати мають місце для зразків, які розміщені по центру вакуумної камери і дещо змінюються при відхиленні від вісі системи, що на прикладі нітридів Ti, Zr ілюструє рис. 3.

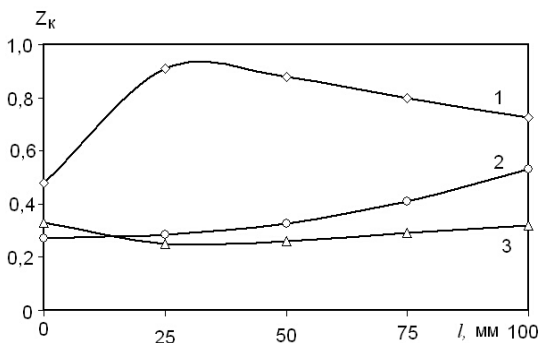


Рис.3. Залежність стійкості при дії кавітації покриттів TiN (1), ZrN (2), Ti-Zr-N (3), одержаних при тискові азоту 0,6 Па і розташованих вздовж лінії, яка перпендикулярна вісі системи.
 $Z_k = V_0/V_b; V_b, V_0$ – швидкість руйнування зразка та еталона (1 мг/год)

Із рис. 3 видно, що для покриття Ti-N максимальну стійкість має зразок, розташований на відстані 25 мм від вісі камери і стійкість змінюється із збільшенням цієї відстані. Окрім того, кавітаційна стійкість покриттів системи Ti-Zr-N вища в 1,15 рази за стійкість мононітриду ZrN для зразків, що знаходяться на вісі камери і нижча в інших положеннях.

Проведені рентгенографічні дослідження показали, що для зразків покриттів системи Ti-Zr-N мають місце дифракційні максимуми, які відповідають структурі нітридів з кристалічною ґраткою типу NaCl. Рефлекси (111) і (222) розташовані між відповідними рефлексами від мононітридів TiN та ZrN. Аналіз показав, що при тискові 3,5·10⁻² Па покриття ZrN має сильну аксіальну текстуру по нормалі до поверхні підкладки, на якій воно висаджується. При тих же технологічних параметрах вакуумно-дугового розряду TiN- та Ti-Zr-N-покриття мають значно меншу текстурованість. Також встановлено, що при формуванні Ti-Zr-N-покриття розміри областей когерентного розсіювання (D) зменшуються майже в 2 рази порівняно з ОКР у TiN-покриттів і в 1,5 рази порівняно з ZrN. Подібна залежність має місце і для покриттів, що формуються при тискові 6·10⁻¹ Па. Але ці покриття мають розміри ОКР приблизно в 1,2 рази більші порівняно із розмірами у покриттів, які одержано при тискові 3,5·10⁻² Па. Розміри ОКР для кожного виду покриттів збільшуються при збільшенні тиску азоту, при якому відбувається формування покриттів. Спостерігається взаємозв'язок розмірів ОКР і мікротвердості покриттів для нецентрального зразків (рис. 4).

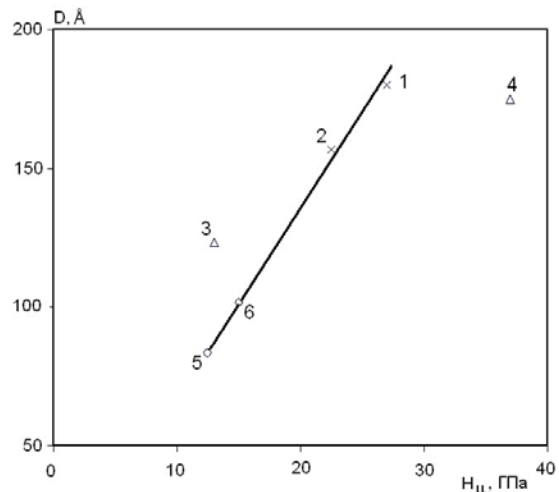


Рис.4. Взаємозв'язок величини ОКР і мікротвердості покриттів TiN (1,2); ZrN (3,4); Ti-Zr-N (5,6), сформованих при тискові азоту 3,5·10⁻² Па (2,3,5) та 0,6 Па (1,4,6). Відстань від вісі камери – 50 мм

Із рис. 4 видно, що наявність цирконієвої плазми при формуванні Ti-Zr-N- покриттів обумовлює зменшення ОКР. Дослідження розмірів кристалографічної ґратки показали, що параметр ґратки майже лінійно збільшується у відповідності із законом Вегарда, тобто формується потрійний нітрид із структурою твердого розчину, що показано в таблиці.

| Параметри | a, Å | | |
|---|-------|-------|---------|
| | TiN | ZrN | Ti-Zr-N |
| Тиск азоту P = 3,5·10 ⁻² Па | 4,260 | 4,620 | 4,520 |
| Тиск азоту P = 6·10 ⁻¹ Па | 4,275 | 4,610 | 4,500 |

Одержані результати підтверджують залежність структурних характеристик покриттів від параметрів технологічного процесу їх формування. В свою чергу, структура покриттів визначає, зокрема, їх механічні характеристики. На рис. 5 подано залежність стійкостей до руйнування при дії кавітації покриттів, одержаних на основі різних металів і в різних умовах конденсації від їх мікротвердості.

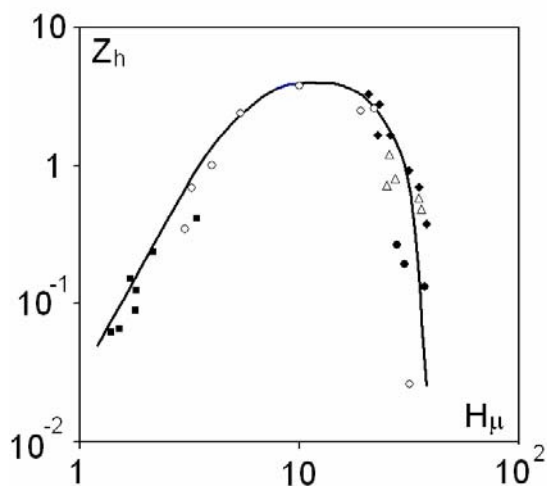


Рис.5. Взаємозв'язок стійкості та мікротвердості покриттів. ■ - Ti; ○ - Cr, CrC, CrN; ◆ - TiN; Δ - NbN; ● - ZrN; $Z_h = W_0/W_h$; W_h, W_0 – швидкість руйнування зразка та еталона (1 мкм/год)

Із рис. 5 видно, що між Z_h і H_μ має місце складна взаємозалежність, яка в значній мірі і відображає вплив структури на визначені механічні характеристики. Аналіз даних показує, що ліва частина кривої описує покриття, які формуються при низькому тискові, і є твердими розчинами атомів втілення. Для них взаємозв'язок між Z_h і H_μ можна представити

співвідношенням $Z_h = aH_\mu^{2,6}$. Права частина кривої описує переважно покриття із нітридів металів, для яких співвідношення має вигляд $Z_h = bH_\mu^{-5,5}$, тобто, при збільшенні мікротвердості кавітаційна стійкість зменшується досить інтенсивно.

Таким чином, експериментальні результати показують, що взаємозв'язок між Z_h і H_μ можна представити у вигляді ступеневої функції, де константа і показник ступеню визначаються структурою покриттів. Максимальне значення Z_h досліджені покриття мають при мікротвердості близько 10 ГПа.

ЛІТЕРАТУРА

1. В.І. Коваленко, В.Г. Маринін. Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікроударному діянні // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1998, №5, с.83–85.
2. В.Г. Маринін, В.І. Коваленко, Л.І. Мартиненко, Ю.М. Соловіченко. *Ерозія вакуумно-дугових титанових покриттів при дії кавітації*. Препринт ХФТИ 2008-2. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2008, 22с.
3. В.І. Коваленко, В.Г. Маринін. Прочность поверхностных слоев циркониевых сплавов и вакуумно-дуговых покрытий при микроударном воздействии // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2008, №1, с. 77 – 80.
4. В.Г. Маринін. Ерозія вакуумно-дугових TiN покриттів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2003, №3. с. 113 – 116.
5. Т.Г. Дробаченко, В.І. Коваленко, В.Г. Маринін. Стойкость гальванических хромовых покрытий к кавитационно-коррозионному воздействию / *Конструкционные сплавы хрома* / Под ред. В.И Трефилова / Киев: «Наукова думка», 1988, 156с.
6. В.І. Коваленко, В.Г. Маринін, В.С. Павлов. Разрушение хромовых конденсатов при воздействии кавитации // *Там же*. С. 52-57.
7. Г.В. Самсонов. *Нитриды*. Киев: «Наукова думка», 1969, 380 с.

Статья поступила в редакцию 29.08.2009 г.

ВЗАИМОСВЯЗЬ КАВИТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ ПОКРЫТИЙ

В.Г. Маринин

Представлены результаты экспериментальных исследований свойств покрытий на основе Ti, Zr, Cr, Nb, полученных при различных давлениях в вакуумной камере осаждением из эрозионной плазмы катодов вакуумно-дуговых разрядов. Получены данные по взаимосвязи микротвердости покрытий и их сопротивлению эрозии при воздействии кавитации.

INTERRELATION CAVITATION RESISTANCE WITH MICROHARDNESS OF THE COATING

V.G. Marinin

Results of experimental researches of properties of the coating on base Ti, Zr, Cr, Nb received at various pressure in the vacuum chamber by sedimentation from erosive plasma of cathodes during a vacuum-arc discharge are submitted. The data on interrelation of microhardness of coating and their erosive resistance under the action of cavitation are received.