

ЗАКОНОМІРНОСТІ КАВІТАЦІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ СФОРМОВАНИХ КОНЦЕНТРОВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ ЕВТЕКТИЧНИХ ПОКРИТТІВ

Проаналізовано вплив структури і основних фізико-механічних властивостей евтектичних покриттів, одержаних з використанням концентрованих джерел енергії, на механізм і кінетику їх кавітаційного зношування. Встановлена кореляція між швидкістю кавітаційного зносу, розміром структурних складових і механічними характеристиками покриття.

Кавітація суттєво впливає на зношування деталей практично всіх машин, в яких робочим тілом є рідина. Встановлено [1-3], що кавітаційне руйнування конструкційних матеріалів має механічну природу. Водночас не можна не враховувати корозійних процесів, внесок котрих у загальне зношування обладнання при порівняно малих зовнішніх мікроударах є досить істотним [4,5]. Це свідчить про складність механізму кавітаційно-ерозійного руйнування металів.

Однак на сьогоднішній день відсутні аргументовані критерії і методи вибору матеріалів для виготовлення деталей обладнання, що піддаються кавітаційному зношуванню. Тому вивчення закономірностей впливу структури матеріалу на процеси зношування в умовах кавітації має важливе наукове і практичне значення.

У даній роботі зроблено спробу дослідити вплив структури та основних фізико-механічних властивостей евтектичних покриттів (ЕП), отриманих із використанням концентрованих джерел енергії, на механізм та кінетику їх кавітаційного зношування.

Методика випробувань

Для покриттів застосовували порошки евтектичних сплавів систем 12X18H9T–TiB₂ (сплави марки ТН), 12X18H9T–TiB₂–CrB₂ (ХТН) і 12X18H9T–TiB₂–VC (ВТН) (ТУ 14-127-161-80, НВО „Тулачермет”) [6]. Металева матриця сплавів відповідає сталі 12X18H9T, а зміцнювальними сполученнями служать дибориди титану та хрому і монокарбід ванадію (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний та фазовий склад порошкових сплавів

Сплав	Вміст компонентів, мас. %							Фази		Вміст зміцнювальних фаз, об. %
	Cr	Ni	Ti	V	B	C	Fe	Матриця	Зміцнювальні сполуки	
ТН	15,7	7,8	8,9	—	4	—	64	-18Cr-9Ni-	TiB ₂	20
ВТН	15,4	7,7	3,2	8,1	1,4	1,9	62	-18Cr-9Ni-	TiB ₂ +VC	21,3
ХТН	20,5	8,6	2,5	—	2,6	—	66	-18Cr-9Ni-	TiB ₂ +CrB ₂	13

Плазмове напилення здійснювали на установці УПУ-3Д. Наносили покриття на мало- та середньовуглецеві сталі, а також на сталь 12X18H9T, оскільки вони мають високі експлуатаційні показники без спеціальної термічної обробки й близький склад із основою сплавів, що, можна сподіватись, зумовить низький рівень напружень у покритті. Мікроструктури покриттів досліджували металографічно, мікротвердість

визначали на приладі М-400 фірми „Leco Corporation” з автоматичним навантаженням. Навантаження на індентор складало 0,02...0,05 кг. Пористість розраховували за даними системи дослідження зображень „ОМНИМЕТ” безпосередньо із шліфів. Для вимірювання міцності зчеплення покриттів використовували штифтовий метод відриву на розривній машині складового елемента збірної підкладки від покриття. Розподіл елементів у покритті встановлювали за допомогою растрового електронного мікроскопа-аналізатора „Camscan-4DV” з програмно-математичним забезпеченням. Корозійну тривкість сплавів вивчали потенціостатичним методом.

Кавітаційну тривкість досліджували магнітно-стрикційним методом, використовуючи ультразвуковий диспергатор УЗДН-2Т при частоті коливань 22 кГц; середовищем була водогінна вода. Зношування покриттів визначали за втратою маси зразка, що фіксувалось на вагах марки ВЛР-200Г і з точністю $5 \cdot 10^{-5}$. Перед кожним зважуванням зразки просушували при температурі 370...380 К протягом 15 хв. В табл. 2 приведені механічні властивості евтектичних сплавів, що застосовувались для нанесення покриттів.

Таблиця 2

Механічні властивості литих евтектичних сплавів

Сплав	Твердість НВ	σ_B , МПа	$\Sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Температура плавлення, °С
ТН	380	610	580	3	1200
ВТН	470	570	550	1,5	1185
ХТН	370	325	300	2	1220
12Х18Н9Т	150	580	220	40	1530

Результати досліджень та їх обговорення

Результати дослідження корозії в статичних умовах (інтенсивність I_K і швидкість h_K) свідчать, що корозійна тривкість сплавів в основному визначається складом металевої матриці і, меншою мірою, кількістю та структурним складом зміцнювальних фаз (табл. 3).

Таблиця 3

Інтенсивність (I_K) і швидкість (h_K) корозії сталі 12Х18Н9Т та евтектичних сплавів

Сплав	Прісна вода		Синтетична морська вода	
	I_K , г/(м ² ·год)	h_K , мм/рік	I_K , г/(м ² ·год)	h_K , мм/рік
ТН	0,00037	0,0004	0,0032	0,0036
ВТН	0,0004	0,00042	0,0037	0,0041
ХТН	0,00032	0,00036	0,003	0,0032
12Х18Н9Т	0,00031	0,00034	0,0029	0,0032

Вихідні порошки евтектичних сплавів містять тонко дисперсні кристали фаз проникнення, розміри яких залежать від швидкості охолодження порошку в процесі його виготовлення, тобто від діаметра (табл. 4) [7].

Таблиця 4

Залежність швидкості охолодження евтектичного порошку ХТН і розмірів кристалів від діаметру порошинок

Діаметр порошинок, мкм	Товщина кристалів, мкм	Швидкість охолодження v , К/с	$\lg v$, %	Примітка
—	3,5	20	1,3	литий сплав
240	2,0	$5 \cdot 10^4$	4,7	—

150	1,2	$8 \cdot 10^4$	4,9	—
58	0,3	$3 \cdot 10^5$	5,48	—
35	—	$6 \cdot 10^5$	5,78	кристали відсутні

Товщина плазмових покриттів становила 200...250 мкм. У напилених евтектичних покриттях спостерігається слабо протравлені області, так звані білі шари, нерозплавлені або частково розплавлені порошинки, а також невелика (до 10 %) кількість порошку. Основний об'єм покриттів складають білі шари (табл. 5). Їх утворення можна уявити так. Порошинки, що попали в середину аргонного плазмового струменя з температурою 10^4 К, в процесі польоту розігріваються. Нагрівання порошку в плазмі, зумовлене переважно теплопровідністю та конвекцією, призводить до його значного розігрівання (набагато більшого за температуру плавлення). Наступне охолодження рідких капель на холодній підкладці з високою швидкістю $10^4 \dots 10^6$ К/с змінює механізм кристалізації – замість характерного для литого стану кооперативного росту евтектичних кристалів здійснюється їх незалежний роздільний ріст, в результаті чого формується структура тонкого конгломерату фаз [8]. Такі кристали не вдалось виявити за допомогою растрового електронного мікроскопа навіть при збільшенні 10^5 раз. При цьому можливе також утворення сильно пересиченого твердого розчину на основі заліза. Отже, отримані під час плазмового напилення ЕП характеризуються нерівноважним станом, який, власне, й повинен визначити їх тривкість при кавітації.

Таблиця 5

Об'ємний вміст і фізико-механічні характеристики структурних складових плазмового покриття з порошкового сплаву ВТН

Структурна складова покриття	Мікротвердість, H_μ , ГПа	Модуль пружності, E_μ , ГПа	Пластичність, A_0/A_Σ	Вміст структурних складових, об. %
Порошинки та евтектичні області	9,5	350	0,40	12...15
Білі та сірі шари	12,7	270	0,61	70...80

Хід кінетичних кривих тривкості плазмових ЕП (рис.1) відрізняються наявністю „сходинок” при загальній тенденції зростання втрати маси зі збільшенням часу випробування. Напевно, вони відображають шаруватість структури покриття. Інтенсивність зношування на початкових етапах кавітації зумовлене високою шорсткістю поверхні плазмових покриттів, що відповідає параметрові $Ra=0,2 \dots 0,3$ мкм, наявністю поверхневої пористості та великої кількості крихких складових.

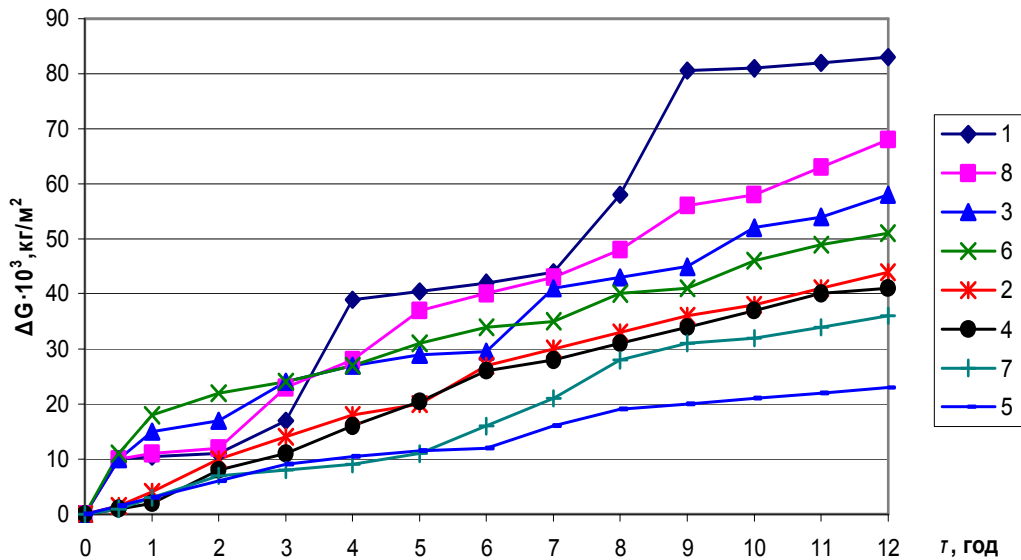


Рис. 1. Кінетичні діаграми кавітаційного зносу евтектичних покриттів:

- 1 – 12X18H9T-TiBr-VC (плазмове напилення); 2 – 12X18H9T-TiB₂-VC (після лазерної обробки);
 3 – 12X18H9T-TiB₂-CrB₂ (плазмове напилення); 4 – 12X18H9T-TiB₂-CrB₂ (після лазерної обробки);
 5 – 12X18H9T-TiB₂-CrB₂ (після електроіскрового легування); 6 – 12X18H9T-TiB₂ (обробка струмами високої частоти); 7 – 12X18H9T; 8 – 12X18H9T-TiB₂(плазмове напилення)

Такі особливості будови покриттів істотно позначаються на їх фізико-механічних характеристиках, знижуючи пластичність і міцність. Завдяки високій хімічній тривкості ЕП вплив корозійного фактора рідкого середовища на їх кавітаційну тривкість не суттєвий. У цьому випадку руйнування мікрооб'ємів поверхневого шару покриття спричиняють циклічність навантаження та багаторазова дія рідини з протіканням втомних процесів у матеріалі. Руйнування матеріалу при циклічному навантаженні починається з накопичення субмікроскопічних дефектів [9], що приводить до зародження мікротріщин. Їх ріст до критичних розмірів, коли енергія, накопичена дефектом, більша за енергію сил зчеплення частинок у його вершині, викликає елементарний акт руйнування. Підповерхневі шари при цьому зазнають значного силового впливу, що проявляється в їх ущільненні, внаслідок чого виникають мікротріщини. Орієнтація мікротріщин свідчить про їх переважне зародження на границях частинок і чисельних поверхневих дефектах у покритті. Утворення системи мікротріщин є механізмом дисипації енергії кавітації, а відокремлення частинок зношування – результатом крихкого викришування. У плазмовому покритті можливі також інші дисипативні явища, зумовлені їх нерівноважним станом (розпад пересичених розчинів, $\gamma \leftrightarrow \alpha$ перетворення в метастабільному аустеніті тощо). Проте сприятливі реологічні властивості ЕП не можуть бути реалізовані через їх низьку адгезійно-когезійну міцність (міцність зчеплення покриття з підкладкою 16...20 МПа).

Металографічними дослідженнями встановлено, що на поверхні покриття після кавітаційного зношування виходять області з білими шарами, що побічно підтверджує їх вищу зносотривкість порівняно з гетерогенною евтектичною структурою. При майже однаковій пластичності білі шари характеризуються більшою мікротвердістю і меншими значеннями модуля пружності, ніж евтектичні складові покриття (табл. 5). Товщина кристалів в евтектиці напилених покриттів становить 1,2...2,0 мкм. Разом з тим ЕП за зносотривкістю поступається перед сталлю 12X18H9T. Аналіз зміни механічних властивостей і кавітаційної тривкості ЕП та сталі 12X18H9T показує (див. табл. 2; 5), що прямої кореляції між міцністю, границею текучості, твердістю і процесом кавітаційного зношування немає. При цьому необхідно враховувати, що в результаті кавітації мікротвердість приповерхневих шарів сталі 12X18H9T підвищується до 6000 МПа внаслідок перетворення метастабільного аустеніту в

мартенсит деформації. Проте спостерігається кореляція кавітаційної тривкості з пластичними властивостями (δ , σ_B , $\sigma_{0,2}$), які характеризують середні механічні показники композицій. Зі збільшенням дисперсності структури, підвищенням пластичності проявляється взаємозв'язок процесів зношування з параметром локальної пластичності A_0/A_{Σ} і модулем пружності E . Проте оцінити одночасно вплив дисперсності на плазмових покриттях неможливо, оскільки суттєвий вклад в зносотривкість вносять пористість та адгезійно-когезійна міцність.

Коректніше підтверджують зроблене припущення результати випробувань кавітаційного зношування електроіскрового покриття, нанесеного електродом зі сплаву ХТН. Основними фазовими складовими покриття є тверді розчини легуючих елементів у γ -залізі. Електроіскрове покриття є білим шаром дрібнокристалічної структури (товщина кристалів до 1 мкм). Покриття відзначається міцним зчепленням з підкладкою, у ньому практично відсутні пори. Кавітаційна тривкість електроіскрового покриття, яка вища, ніж плазмового покриття та сталі 12Х18Н9Т, зумовлена, мабуть, його властивостями, $H_{\mu}=14200$ МПа; $E_{\mu}=230$ ГПа; $A_0/A_{\Sigma}=0,6$. Порівняно з плазмовим покриттям електроіскрове більш тверде і пластичне.

Відомо, що оплавлення плазмових покриттів суттєво впливає на їх структуру, фізико-механічні та триботехнічні властивості [10]. Щоб дослідити вплив швидкості нагрівання та охолодження на структуру й кавітаційну тривкість, оплавлення проводять струмами високої частоти і лазером. Мікроструктура оплавлених покриттів має стовпчасто-дендритну будову. Порівняно з первинною мікроструктурою метал, внаслідок дії концентрованої енергії випромінювання, знаходився в рідкому стані. Під впливом значного температурного градієнта і, відповідно, величезної швидкості кристалізації, головні осі дендритів росли паралельно до напрямку тепловідведення. Оплавлені покриття практично безпористі. Кавітаційна тривкість плазмових покриттів, оплавлених лазером, вища, ніж оплавлених СВЧ. Це зумовлено, швидше всього, оптимальнішими фізико-механічними властивостями покриттів після лазерної обробки та високим ступенем диференційованості складових евтектики (лазер – $H_{\mu}=8,4$ ГПа; $E_{\mu}=310$ ГПа; $A_0/A_{\Sigma}=0,60$; товщина кристалів $d=1,5$ мкм; СВЧ – $H_{\mu}=7$ ГПа; $E_{\mu}=370$ ГПа; $A_0/A_{\Sigma}=0,35,35$; $d=3$ мкм). Процеси мікронаклепу та втоми локалізуються в її невеликих міжпластинчатих об'ємах. Очевидно, існує певний зв'язок між мікроскопічною площею кавітаційного впливу (≈ 10 мкм²) і розмірами зерен (дендритів), міжпластинчатою відстанню складових евтектики. Подрібнення структури одних і тих же евтектичних покриттів, отриманих різними методами, призводить до зменшення зносу (див. рис. 1). Найбільше зношуються плазмові покриття, в яких тріщини зароджуються переважно в місцях контакту напилених частинок. Руйнуються покриття внаслідок утворення в цих об'ємах сітки дрібних тріщин, розрихлення та вимивання частинок напиленого порошку. При кавітації покриттів, оплавлених лазером, тріщини також зароджуються на границях зерен, однак розміри їх на порядок менші, ніж у плазмових без обробки. Разом з там вища кавітаційна тривкість ЕП системи ВТН зумовлена, можливо, більшим вмістом вуглецю в мартенситі деформації. Евтектичні електроіскрові покриття характеризуються найменшими параметрами структури і дуже високою кавітаційною тривкістю. Розміри структурних складових покриття при цьому методі становлять біля 1 мкм. Співвідношення розміру структурних складових покриття і площі гідравлічного удару (1:10) дозволяє реалізувати структурні особливості композиційного матеріалу. При цьому опір покриття гідравлічному ударові визначається усередненими властивостями фазових складових ультрадисперсної структури, а не окремою структурною складовою, від властивостей якої звичайно і залежить опір кавітаційному зношуванню плазмових та оплавлених з невисокою швидкістю охолодження покриттів (СВЧ).

Таким чином, один із параметрів, за допомогою якого можна керувати кавітаційною тривкістю, є дисперсність структури покриття. Як відомо, на розмір зерен

і між пластинчату відстань впливає швидкість охолодження [11]: $d=A \cdot v^{-n}$, де d - дендритний параметр, мкм; v – швидкість охолодження, К/с; A і n -постійні.

Для пластинчатої евтектики міжпластинчата відстань може бути визначена із виразу: $R=A/\Delta^2$, де A – параметр, що залежить від типу сплаву, м³/с; R - швидкість росту, м/с; Δ - міжпластинчата відстань, м.

Аналіз літературних даних, а також власних результатів, дає підставу рекомендувати кількісну оцінку кавітаційної тривкості здійснювати за такими фізико-механічними властивостями: H , E , $(\sigma_B - \sigma_{0,2})$, δ , d , Δ , Π (пористість, %). Для гетерогенних композиційних покриттів евтектичного типу за кавітації зношування швидкість зношування ω (г/м²) можна подати емпіричною формулою:

$$\omega \approx \frac{E \cdot d \cdot \Delta^2 \cdot \Pi}{H^{1/2} \cdot \delta \cdot (\sigma_B - \sigma_{0,2})}$$

Висновки

Один із важливих результатів даного дослідження – виявлення переважного впливу локальної пластичності гетерогенного матеріалу на зносотривкість в умовах кавітації. Отже, керуючи величиною дисперсних кристалів фаз проникнення і одночасно станом металевої матриці, можна підібрати технологічні параметри концентрованих джерел енергії, за яких покриття будуть набувати оптимальних фізико-механічних зносотривких властивостей при кавітаційному зношуванні.

The eutectic coatings, formed by using the concentrated energy sources have been analyzed. The influence of the structure and of the main physicomachanical characteristics of the eutectic coating to the mechanism and kinetics of their cavitation wear and dimensions of the structural phase compound and the mechanical properties of the eutectic coating have been established.

Література

1. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. - М.: Машиностроение, 1971.-240 с.
2. Эрозия: Пер. с англ./ Под ред. К.М. Прис. - М.: Мир, 1982. - 464 с.
3. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов. - М.: Metallurgy, 1972. - 356 с.
4. Закономерности кавитационно-эрозионного изнашивания металлов в коррозионных средах / М.С. Стечишин, А.И. Некоз, Л.И. Погодаев, А.С. Протопопов // Трение и износ. - 1990. – 11 №3. - С. 454-463.
5. Чернега С.М., Евтушенко О.В. Коррозионно-кавитационная стойкость стали с покрытиями // Защитные покрытия на металлах. – Киев: Наук. думка, 1994.- Вып. 28. - С. 41-43.
6. Шурин А.К., Панарин В.Е., Киндрачук М.В. Износостойкость нержавеющей эвтектических сплавов с фазами внедрения // Пробл. трения и изнашивания. - 1981. - №19. - С. 17-28.
7. Газотермическое покрытие из эвтектических сплавов на основе железа с ультрадисперсной структурой / В.Е. Панарин, О.В. Микуляк, М.В. Киндрачук, А.И. Бондарь // Защитное покрытие на металлах. - Киев: Наук. думка, 1988. - Вып. 22.- С. 26-30.
8. Таран Ю.Н., Мазур В.И. Структура эвтектических сплавов.- М.: Metallurgy, 1978.-312 с.
9. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. - М.: Metallurgy, 1975. - 456 с.
10. Киндрачук М.В. Влияние структуры эвтектических плазменных покрытий на их триботехнические свойства в широком диапазоне температур // Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 1994. - №4. - С. 66-71.
11. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Методы поверхностной лазерной обработки. - М.: Высш. шк., 1987. -191 с.

Одержано 31.08.2004 р.