

МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 539.4:669.017:620.193

О.Калахан, канд. техн. наук; Г.Охота

Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка Національної академії наук України, м. Львів

КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ НА ТИТАНОВИХ СПЛАВАХ

Досліджено вплив плазмового напилення порошків різного хімічного складу та структури на працездатність титанового сплаву ТС-5 складу $Ti-5,0Al-2,0Zr-3,0Sn-2,0V$ в умовах фретінг-втоми та корозійної фретінг-втоми. Покриття порошком $(\alpha+\beta)$ -сплава ТС-8, механічною сумішшю самофлюсових порошків сплавів на нікелевій основі (NiCrBSi) та карбідів вольфраму (WC) підвищують границю фретінг-втоми на 10...15%, а напилення композиційним плакованим порошком (Ni)-(Al₂O₃) – на 40 % та більше. 3%-ний розчин хлориду натрію знижує границю фретінг-утоми всіх покриттів на 5–10% у порівнянні з повітрям, а зразків з покриттям порошком карбідів титану та хрому – до 20%.

Вступ

Титанові лопатки використовуються в циліндрах низького тиску парових турбін АЕС, для яких зустрічаються випадки фретінг-втомного руйнування в зоні контакту поверхні зі спряженими деталями. Контактне тертя різко знижує границю втоми, впливаючи подібно концентратору напружень.

Перспективним для зниження чутливості титанового сплаву до фретінг-утоми є плазмове напилення твердших покриттів на контактні поверхні [1-3]. Пошуки ведуться першочергово шляхом вибору найефективніших складів покриття із трьох основних груп матеріалів [4]: металевих та інтерметалевих покриттів, твердосплавних карбідних і боридних сполук з домішками металевих зв'язок та оксидів металів (TiO₂, Al₂O₃, Cr₂O₃, ZrO₂). Суттєвим недоліком матеріалів першої групи є їх низька корозійна стійкість. Матеріали решти груп володіють добрими антифрикційними властивостями в однорідних та різнорідних парах тертя, корозійною стійкістю.

Мета роботи – оцінити вплив плазмового напилення порошків різного хімічного складу на фретінг-втому та корозійну фретінг-втому псевдо- α сплаву ТС-5.

Матеріали та методики досліджень

Зразки розміром 110×14×5 мм виготовляли з титанового сплаву ТС-5 (Ti-5,0Al-2,0Zr-3,0Sn-2,0V). Механічні характеристики сплаву, визначені на п'ятикратних зразках діаметром 5 мм, такі: $\sigma_B=940$ МПа, $\sigma_{0,2}=870$ МПа, $\delta=16,5$ %, $\psi=34$ %. Робочі поверхні напиляли порошком $(\alpha+\beta)$ -сплаву ТС-8 (Ti-6,0Al-4,0Mo-3,0Zr-2,0Sn-2,0V-1,0Fe-1,0Ni-0,6Cr), механічною сумішшю самофлюсових порошків сплавів на нікелевій основі (NiCrBSi) та карбідів вольфраму (WC) марки ПС-12НВК-01 (35% WC; 16 Cr; 5,0 Fe; 4,3 Si; 3,5 В; 0,8% С; решта - Ni), порошком карбідів титану та хрому (28...32% Ni; 72...68% Cr₃C₂-TiC), композиційним плакованим порошком (Ni)-Al₂O₃ марки ПОАН-30 (70% Al₂O₃, 30% Ni). Для напилення використовували фракцію 40...100 мкм, попередньо просушену за температур 130...150 °С тривалістю 2 год. Для надання поверхні необхідної шоршавості та зняття оксидної плівки проводили струминно-абразивну обробку електрокорундом із розміром зерна 500...1000 мкм.

Довговічність сплаву без та за наявності покриттів за умов фретінг-утомного руйнування оцінювали за часом до повного руйнування плоских зразків консольним згином (рис. 1) [1].

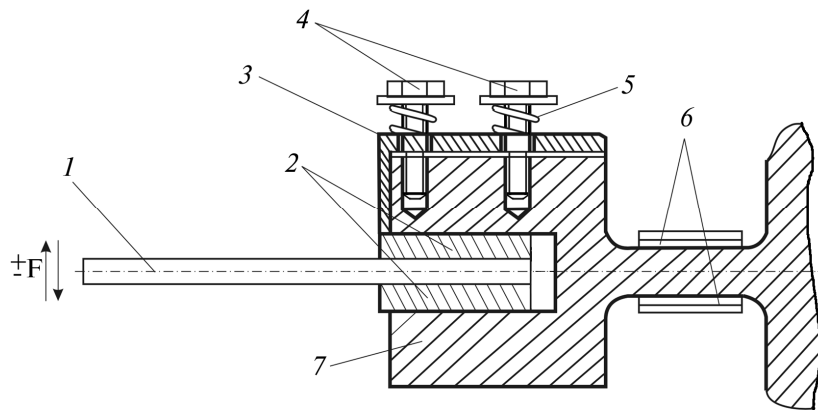


Рис. 1. Пристрій для відтворення фретінгу під час втомних випробувань

В нерухомому захваті F затискували основний зразок 1 поміж пластинок – накладок 2 Г-подібним затискачем 3 . Силу притискання регулювали чотирма пружинами 5 за допомогою зтяжних прогоничів 4 . Вільний кінець зразка 1 навантажували силою $\pm F$, реєстрацію величини якої здійснювали тензодатчиками 6 , сигнал з яких подавався на осцилограф. База випробувань $1 \cdot 10^7$ циклів; амплітуда напружень $\sigma_a = 80 \dots 200$ МПа; частота навантаження $f = 14 \dots 20$ Гц. Середній контактний тиск у зоні фретінгу $q = 25 \dots 70$ МПа залежно від напружень. Взаємне проковзування в місці фретінгу (амплітуду δ) оцінювали за методом згину консолі [5]. Корозійну фретінг-утому вивчали в 3%-му розчині NaCl. Мікротвердість зразків вимірювали на приладі ПМТ-3 під навантаженням $0,49$ Н.

Результати дослідження та їх аналіз

Зразки виготовляли з кованки, що мала крупнозернисту будову з рівновісними або витягнутими β -зернами (рис. 2а, б). Внутрішній об'єм β -зерна розщеплений α -часточками, які зібрані в пакети (α -колонії). α -часточки мають пластинчасту форму. Середній діаметр β -зерна від 404 до 800 мкм, середній лінійний розмір α -колоній >100 мкм.

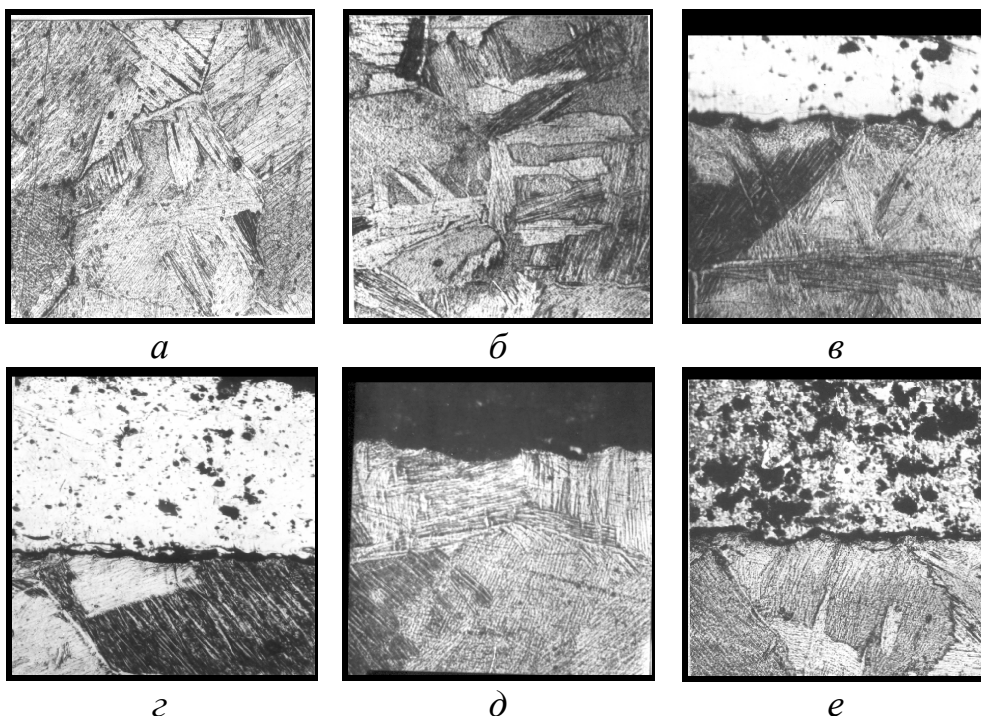


Рис. 2. Мікроструктура сплаву TC-5 без (а, б) та за наявності плазмових покриттів порошками ПС-12НВК-01 (в), ПОАН-30 (г), ($\alpha+\beta$) сплаву TC-8 (д), карбідів титану та хрому (е), $\times 200$

Структура покриттів, одержаних плазмовим напиленням гетерогенна та складається з дискретних часточок з більш або менш яскраво вираженими межами розділу (рис. 2, *в-е*). Висока гетерогенність покриттів обумовлена виникненням різних видів границь – міжзеренних, міжфазних, між деформованими часточками, шарами, покриттям та основою; утворенням під час напилення додаткових фаз, твердих розчинів пересичених елементами, що входять у склад покриття та забезпечують його зміцнення. Окрім того наявна яскраво виражена поверхня розділу. Наслідком та характерною особливістю плазмової технології нанесення покриттів є локальна зміна хімічного складу, яка приводить до хімічної неоднорідності окремих ділянок. Всі покриття характеризуються добрим зчепленням з основою. Термічний вплив на основу виключав небажані структурні перетворення в ній, а також деформацію зразків.

Виявлено (рис. 3), що характер розподілу мікротвердості за товщиною покриттів залежить від їх природи. При віддаленні від основи мікротвердість покриття зростає. Зниження мікротвердості біля основи пов'язано з більш швидким охолодженням та твердінням часточок, які збільшують пористість покриття даної зони. Подальше швидке охолодження часточок, розміщених ближче до основи, викликає в них великі внутрішні напруження та зростання мікротвердості. Чим ширша зона проміжного шару, яка коливається в межах 0,02...0,11 мм залежно від покриття, тим повільніше зростає мікротвердість. Відмінною рисою покриття ПОАН-30 (рис. 3, крива 2) є ступінь інтенсивності зростання мікротвердості в проміжному шарі. Максимальні значення мікротвердості досягаються на відстані 0,04...0,1 мм від границі проміжного шару. Для покриття порошком карбідів титану та хрому (рис. 3, крива 4) одержана твердість залишається майже сталою до поверхні покриття. Для інших покриттів характерно спадання та стабілізація мікротвердості.

Відтворення фретінгу при втомних випробуваннях здійснювали на зразках, які утворювали пару фретінгу при контакті двох плоских поверхонь протягом всього випробування (рис. 1). Такий тип випробувань допускає свободу можливої сумісної дії фретінгу та власне процесу втоми та уподібнюється до корозійно-втомних випробувань [6].

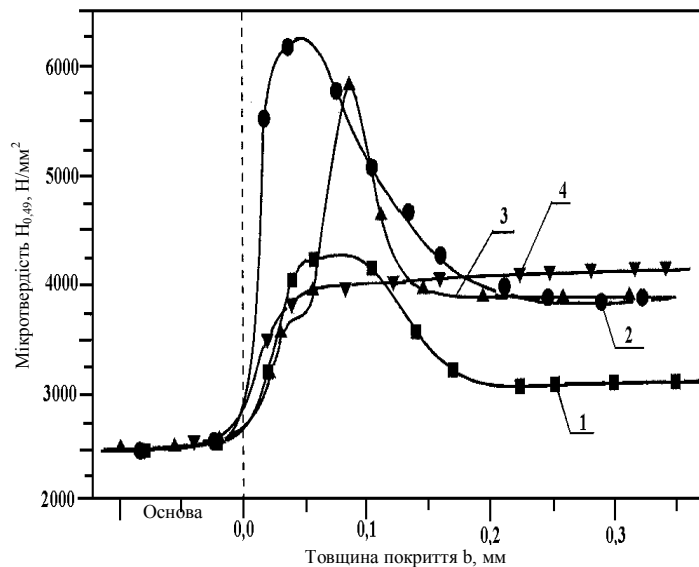


Рис. 3. Розподіл мікротвердості за товщиною плазмових покриттів порошками ПС-12НВК-01 (1), ПОАН-30 (2), ($\alpha+\beta$) сплаву ТС-8 (3), карбідів титану та хрому (4)

В умовах фретінгу границя втоми плоских зразків сплаву [7] знижується на 60...70% та становить 90 МПа, тобто $0,1\sigma_b$. Коефіцієнт зниження міцності сплаву (відношення границі втоми до границі фретінг-втоми $\sigma_{l1} / \sigma_{lfp}$) в парі з однотипним сплавом дуже високий (3,1). Руйнування відбувається в зоні фретінг-контакту пари зразка з накладкою завширшки 0,5...2 мм, проковзування 1,0...2,2 мкм. Корозійне

середовище (3 %-ий NaCl) незначно знижує границю втоми титанового сплаву ТС-5, тобто мало підсилює фретінг-ефект (рис. 4).

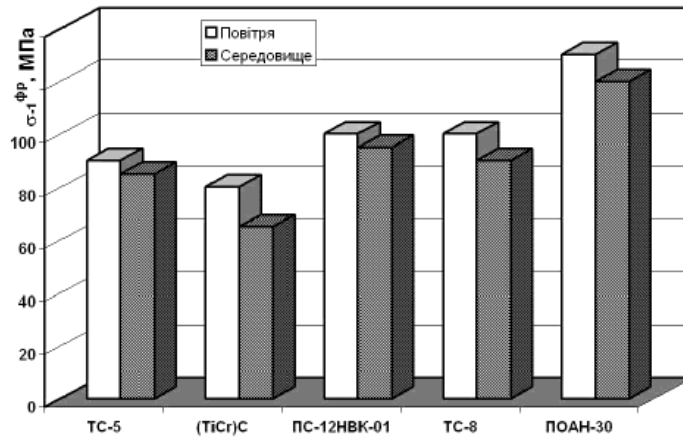


Рис. 4. Фретінг-втомна довговічність сплаву ТС-5 без та за наявності плазмових покриттів

В умовах фретінг-втоми тільки плазмове напилення порошком карбідів титану та хрому ще більше знижує границю фретінг-втоми (рис. 4). Покриття порошками ($\alpha+\beta$)-сплаву ТС-8 та ПС-12НВК-01 підвищують границю втоми на 10% ($\sigma_{-1} = 100$ МПа), а порошком ПОАН-30 – понад 40% ($\sigma_{-1} = 130$ МПа). Як наслідок, зазначені покриття виявляють коефіцієнти зниження довговічності – 2,1 та 2,8, а, отже, проявляють менший пошкоджуючий ефект. Розчин хлориду натрію знижує границю фретінг-втоми усіх покриттів на 5...10% порівняно з повітрям, а зразків з покриттям порошком карбідів титану та хрому – до 20%. Досліджені покриття за зростаючим ступенем впливу на фретінг-втому та корозійну фретінг-втому сплаву розташовуються так: порошком карбідів титану та хрому, порошком сплаву ТС-8, ПС-12НВК-01, ПОАН-30. Найефективніші за цих умов – покриття ПОАН-30, яке містить 70 % оксидів алюмінію.

Порошкоподібні продукти руйнування сплаву, які утворилися між зразком та накладками, ідентифікували рентгеноструктурним аналізом. Аналіз дебаєграм, знятих в $Su_{k\alpha}$ -випромінюванні показав, що продукти зношування складаються з оксидів титану (67% Ti_2O_3 , 21% Ti_4O_7 , 13% TiO_2) та слідової кількості металевих часточок титану. Металевий титан виявляли тільки у випадках значного зниження втомної міцності титанових сплавів через фретінг [6].

Вивчення рельєфу поверхні дозволило оцінити форму та розміри пошкоджених ділянок, а запис профілю поверхні – розрізнити западини та опуклості, які важко визначити мікроскопічними спостереженнями.

Локальні виразки на поверхні умовно розділяють на дві групи [6]: сегментні заглиблення та маленькі глибокі отвори (рис. 5). Перші (рис. 5а) з'являються тоді, коли окиснені продукти фретінгу виходять із зони початкового ураження та абразивно зношують суміжні поверхні. Інші виникають, коли продукти фретінгу повністю замкнені всередині цієї зони (рис. 5б). Часто зустрічаються й утомні тріщини, перпендикулярні до напрямку взаємного переміщення контактних поверхонь. На рис. 5в наведено профілограму пошкодженої поверхні сплаву, на якій деякі ділянки припідняті над нормальним її рівнем із-за перенесення металу з накладок. Оксидні продукти руйнування мають більший об'єм, аніж основний метал, з якого вони утворилися. Тому вміст глибоких отворів знаходиться під великим тиском [6]. Запис профілю таких отворів показав (рис. 5г), що метал витискується в обідок, що є свідченням знаходження їх вмісту під тиском.

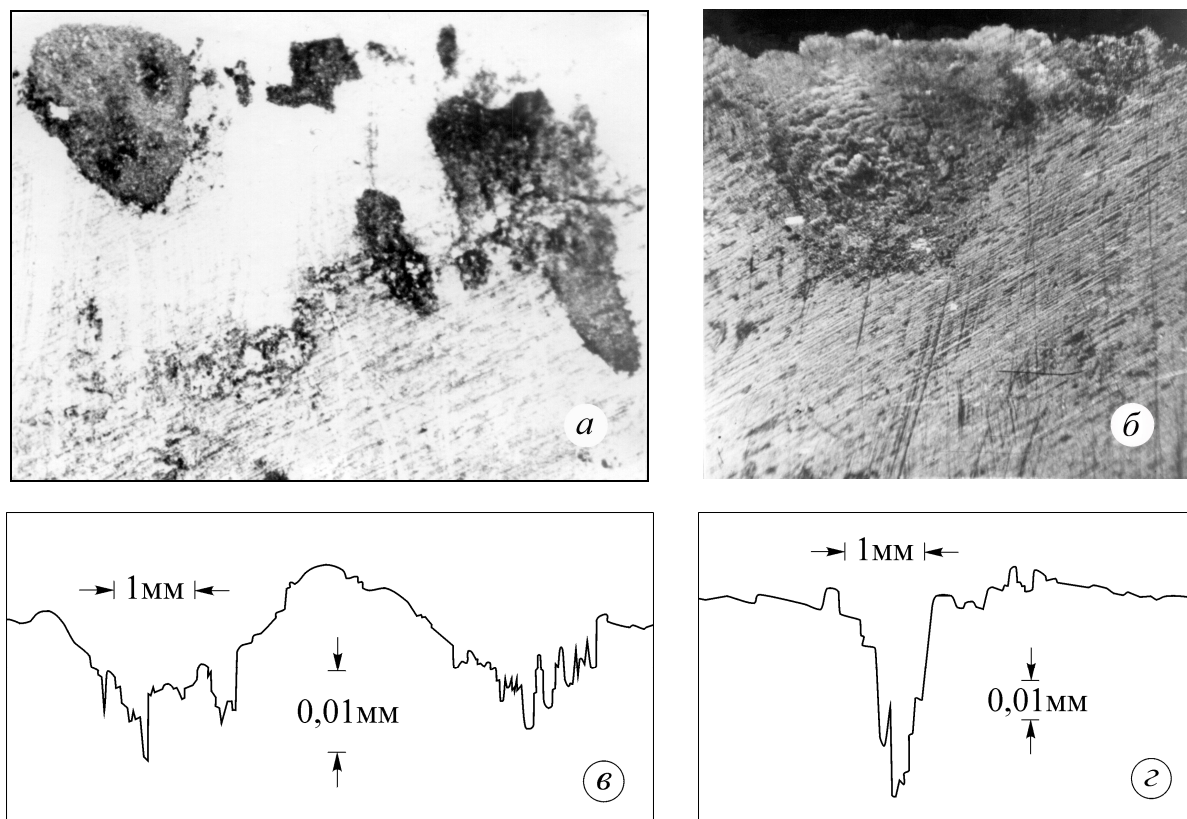


Рис. 5. Фретінг-втомне пошкодження сплаву ТС-5 (а, б), х15 та його профілограми (в, г): а, в – сегментні заглиблення; б, г – глибокі отвори

Результати лабораторних випробувань, що моделювали роботу бандажних полицок лопаток турбін з титанового сплаву, перевірено в реальних умовах експлуатації. Пошкоджень покриттів на бандажі та пері лопаток не виявлено. Покриття ефективно захищають лопатки не тільки від фретінг-втомного руйнування, але й ерозійного зносу, зумовленого парою.

Висновки

Кращі властивості в умовах фретінг-втоми та корозійної фретінг-втоми має сплав з покриттям ПОАН-30, дещо гірші - з покриттями ПС-12НВК-01 та порошком сплаву ТС-8, а найгірші - з покриттям порошком суміші карбідів титану та хрому.

Характер розподілу мікротвердості за товщиною плазмових покриттів залежить від їх природи. Чим ширша зона проміжного шару (0,02...0,11 мкм залежно від покриття), тим повільніше зростає мікротвердість. Максимальні значення мікротвердості досягаються на відстані 0,04...0,1 мм від границі проміжного шару. Відмінною рисою покриття ПОАН-30 є інтенсивніше зростання мікротвердості в проміжному шарі.

The influence of plasma coating of different chemical composition and structure, obtained by powders spraying on the serviceability of titanium Ti-5,0 Al-2,0 Zr-3,0 Sn-2,0 V alloy under fretting-fatigue and corrosion-fretting fatigue fracture has been investigated. Coatings made of (TC-8 alloy ($\alpha+\beta$) powder, mechanical mixture of self-fluxing nickel-based (NiCrBSi) alloy powders and tungsten carbides (WC) improve the fatigue strength by 10...15%, while spraying by the (Ni)-(Al₂O₃) coated powder increases the fretting-fatigue limit by 40% and more.

Література

1. Похмурський В. І., Калахан О. С. Здатність плазмових покриттів захищати титанові сплави від корозійного фретінг-втомного руйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів.-1997.-№3.-С. 72-76.
2. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С.Борисов, Ю.А.Харламов, С.Л.Сидоренко, Е.Н.Ардатовская. - К.: Наук. думка, 1987.- 543 с.
3. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. – М.: Наука, 1977. – 184 с.

4. Горынин И. В., Чечунин Б. Б. Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
5. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости / Пер. с англ. - М.: Наука, 1975.- 575 с.
6. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия.-Л.: Машиностроение. 1976.- 272 с.
7. Изучение коррозионно-усталостного поведения титанового сплава ТС-5 и стали 15Х11МФ для использования в оборудовании геотермальных энергосистем / О.А.Поваров, Г.В.Томаров, О.С.Калахан, И.А.Смирнова // Теплоэнергетика. - 1994.-№8.-С. 30-36.

Одержано 24.11.2003 р.