

УДК 621.793; 669.8; 621.762; 669.018.45; 532.696.1

М.С. Українець, О.П. Уманський, О.М. Полярус, О.В. Куцев, О.У. Стельмах
ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ВИПРОБУВАНЬ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ
ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ СИСТЕМИ NiAl-CrB₂

У статті проаналізовано вплив температури випробувань на триботехнічні характеристики композиційних покриттів системи NiAl-CrB₂ із різним вмістом дибориду хрому. Проведено дослідження поверхонь тертя розроблених плазмових покриттів NiAl, NiAl-5% CrB₂ та NiAl-15% CrB₂. Показано, що на характер зношування суттєво впливає температура випробувань, а також кількість тугоплавкої домішки.

Ключові слова: композиційні покриття, інтерметалід NiAl, диборид хрому, зносостійкість, високотемпературні трибовипробування.

Рис. 5. Літ. 2.

М.С. Украинец, А.П. Уманский, Е.Н. Полярус, А.В. Куцев, А.У. Стельмах
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПЫТАНИЙ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ NiAl-CrB₂

В статье проанализировано влияние температуры испытаний на триботехнические характеристики композиционных покрытий системы NiAl-CrB₂ с различным содержанием диборида хрома. Проведены исследования поверхностей трения разработанных плазменных покрытий NiAl, NiAl-5% CrB и NiAl-15% CrB₂. Показано, что на характер износа существенно влияет температура испытаний, а также количество тугоплавкой составляющей.

Ключевые слова: композиционные покрытия, интерметаллид NiAl, диборид хрома, износостойкость, высокотемпературные трибоиспытания.

M. Ukrainets, O. Umanskyi, O. Poliarus, O. Kushev, O. Stel'mah
THE TESTS TEMPERATURE INFLUENCE ON TRIBOLOGICAL
CHARACTERISTICS OF NiAl-CrB₂ COMPOSITE COATINGS

The tests temperature influence on tribological characteristics of NiAl-CrB₂ composite coatings with various chromium diboride content has been investigated in this work. The friction surfaces of NiAl, NiAl-5% CrB₂ and NiAl-15% CrB₂, developed plasma spraying coatings has been studied. It was shown, that the tests temperature and refractory additives content are significantly influences on the wear pattern.

Keywords: composite coatings, NiAl-intermetallics, chromium diboride, wear resistance, high temperature tribotests.

Вступ. Проблема підвищення надійності та довговічності деталей ГТД завжди залишається актуальною. Існуючі матеріали для захисту деталей ГТД на даний час вичерпали свої можливості. У зв'язку з цим, необхідним вирішенням даної проблеми є розробка нових матеріалів, що працюють в умовах підвищених температур і навантажень. Такими матеріалами є композити, які представляють собою пластичну матрицю з рівномірно розподіленими в ній твердими включеннями. У даній роботі досліджуються триботехнічні властивості жаро- і зносостійких композиційних покриттів для захисту пари тертя «корпус ГТД-горіть лопатки». Раніше авторами роботи [1] було показано, що підвищити зносостійкість деталей проточного тракту турбіни ГТД можливо шляхом створення покриттів на базі чотирьохкомпонентних сполук Fe(Ni)-Cr-Al-Y або на базі Ni-Al з домішками тугоплавких оксидів HfO₂, ZrO₂. Однак, використання оксидів в якості функціонального наповнювача не забезпечує належної фізико-хімічної взаємодії компонентів (змочування) в системі «основний матеріал-наповнювач». Такі оксиди утримуються в матеріалі тільки за рахунок зв'язків механічного характеру. У процесі тертя вони будуть викришуватися із металевої матриці, що, в результаті буде призводити до більшого зносу матеріалу. Виходячи з цього, були розроблені композиційні матеріали на основі системи «інтерметалід-тугоплавка сполука». В роботі [2] показано, що при високотемпературних трибовипробуваннях плазмових покриттів із двох поширених в авіаційній промисловості інтерметалідів – NiAl і Ni₃Al, вищу зносостійкість має NiAl. Тому, в якості матриці композиту використовується інтерметалід NiAl, який забезпечує жаростійкість при високих температурах, а в якості тугоплавкої складової обрано CrB₂. Вибір дибориду хрому в якості зміцнюючої фази обґрунтований тим, що він має високу твердість, а також високу зносо- і жаростійкість. При змочуванні в системі NiAl-CrB₂ утворюються контактні кути $\Theta = 20^\circ$ і не спостерігається активної фізико-хімічної взаємодії між компонентами. Мета даної роботи – дослідити вплив початкової температури випробувань і складу композиційних покриттів на основі NiAl на механізми їх зношування.

Експериментальна частина. В якості базового порошку для напилення використовували серійний порошок ПН70Ю30, що відповідає інтерметаліду NiAl. Композиційні порошки для

нанесення покриттів були отримані шляхом змішування порошків вихідних компонентів в співвідношенні NiAl-5% CrB₂ та NiAl-15% CrB₂ (тут і далі мас.%) з подальшим їх конгломеруванням на органічній зв'язці і відсівом до фракції 70-100 мкм. Напилювання покриттів на торцеві поверхні зразків із Ст. 3 діаметром 10 мм проводилося у відкритій атмосфері за допомогою плазмової установки УПУ-3Д. В якості плазмоутворюючих газів використовувалася суміш аргону і водню, в якості транспортуючого газу – аргон. Для кращої адгезії між сталеву підкладку і покриттям, на підкладку було нанесено підшар із термореагуючого серійного порошку ПТЮ5Н. Товщина покриттів становила ~ 500 мкм.

Триботехнічні випробування зразків із композиційними плазмовими покриттями проводили на машині тертя, що обладнана високотемпературним модулем за схемою «стержень-диск» в парі з жаростійким сталевим контртілом із сталі Р18 без мастильних матеріалів при навантаженні 8 МПа. Швидкість обертання $V = 14$ м/с, пройдений шлях $S=1$ км. Початкова температура випробувань $T=20$ °С, $T=500$ °С. Коефіцієнт тертя для всіх випробовуваних покриттів склав 0,3-0,35. Мікроструктура напилених покриттів, а також структура і фазовий склад поверхонь тертя були досліджені на растровому електронному мікроскопі РЕМ – 106И та за допомогою мікроаналізатора JEOL JAMP – 9500F.

Результати та обговорення. За даними мікроаналізу структура композиційних плазмових покриттів є ламелеподібною (рис. 1). Розроблені покриття складаються з двох фаз: світло-сірої інтерметалідної матриці та рівномірно розподілених в ній включень боридів (чорні вкраплення).

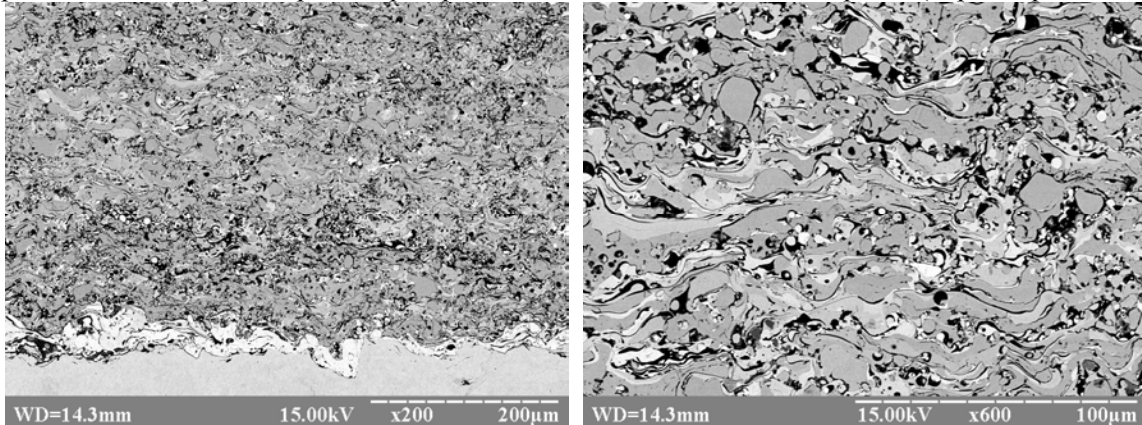


Рис. 1. Мікроструктура композиційних покриттів NiAl-CrB₂

Досліджувані матеріали призначені для роботи в діапазоні високих температур, тому трибовипробування зразків із покриттями проводили при початковому підігріві печі до $T = 500$ °С, а з метою виявлення впливу температури випробувань на механізми зношування, були проведені додаткові дослідження триботехнічної поведінки розроблених покриттів при початковій температурі випробувань $T = 20$ °С.

На рис. 2 наведені результати інтенсивності зношування плазмових покриттів при трибовипробуваннях.

Процес зношування всіх досліджуваних покриттів супроводжується втратою маси, яка, в перерахунку на лінійний знос, складає 2,31 і 0,75 мм/км для покриття NiAl (при $T=20$ °С і $T=500$ °С відповідно), 1,6 та 0,65 для покриття NiAl-5%CrB₂, 0,4 та 0,2 для покриття NiAl-15%CrB₂ (рис. 2).

Значення інтенсивності зношування покриття NiAl при $T=20$ °С обумовлені крихкістю даного матеріалу при низьких температурах. При підвищенні температури до $T=500$ °С знос даних покриттів зменшується у 3 рази. Такий результат може бути пов'язаний з окисними процесами, які призводять до утворення оксидних плівок на поверхні покриття та запобігають його інтенсивному зношуванню.

Для покриття, що містить 5% дибориду хрому спостерігається незначне підвищення зносостійкості в порівнянні з вихідним покриттям із NiAl. Зменшення зносу такого покриття при температурі випробувань $T=20$ °С обумовлено наявністю твердих включень боридів, які виконують роль зміцнюючої фази в покритті. Зменшення інтенсивності зношування покриття NiAl-5%CrB₂ при $T=500$ °С можна пояснити тим, що в процесі високотемпературних трибовипробуваннях поряд із утворенням оксидів на основі Ni та Al відбувається також утворення оксидів Cr та B.

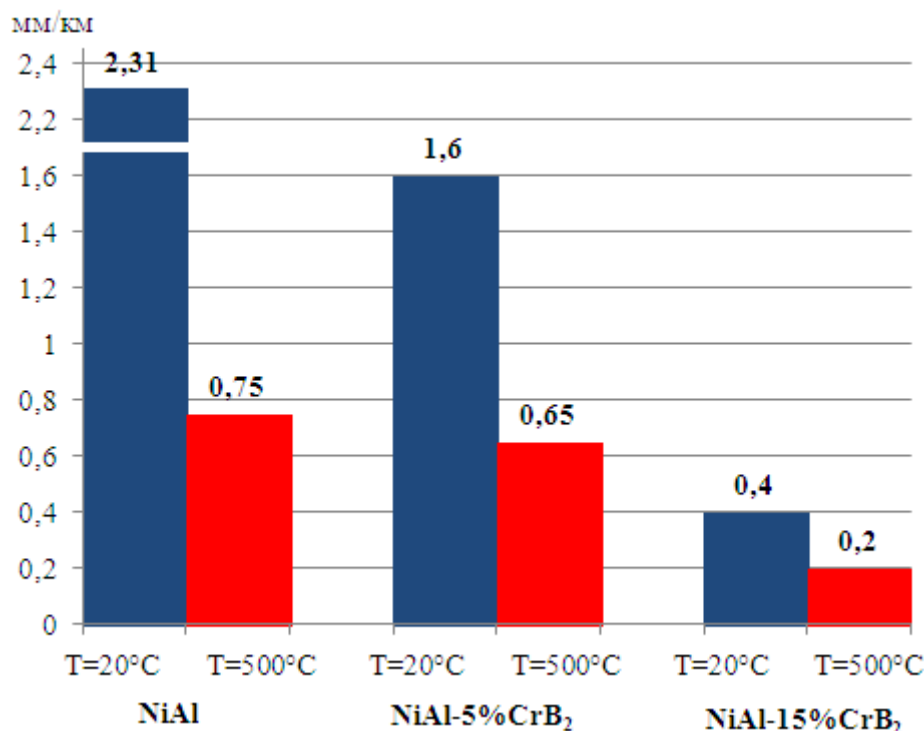


Рис. 2. Інтенсивність зношування плазмових покриттів

Із підвищенням вмісту тугоплавкої складової, значення інтенсивності зношування значно зменшуються. Так, при температурі випробувань $T=20^{\circ}\text{C}$ для покриття, що містить 15% дибориду хрому знос суттєво зменшується у порівнянні з покриттям NiAl (рис. 2). Це пояснюється наявністю у покритті досить великої кількості включень CrB₂. Така кількість тугоплавкої фази надає покриттю антифрикційних властивостей.

Отже, покриття, які містять тугоплавку складову, працюють значно ефективніше в порівнянні з вихідним покриттям з інтерметаліду NiAl. Отримані результати підтверджуються відповідними структурами поверхонь тертя покриттів (рис. 3, 4).

В роботі досліджено вплив складу покриттів на характер їх зносу при двох температурах. Вплив складу покриттів на характер їх зносу при початковій температурі випробувань $T=20^{\circ}\text{C}$. Структура поверхні тертя покриття NiAl, випробуваного при $T = 20^{\circ}\text{C}$, характеризується ділянками ушкодження у вигляді налипання матеріалу контртіла на поверхню покриття і складається із двох характерних фаз (рис. 3, I-a): світлої і темної. За даними МРСА світла фаза містить 69 % Ni та по 13 % Fe і Al, темна фаза складається в основному із заліза (75 %), а також містить 12% O та 8% Ni. Наявність таких фаз можна пояснити тим, що при випробуваннях за наведених умов в зоні тертя має місце захоплення матеріалу покриття із матеріалом контр тіла, а також часткове окиснення поверхні сталевого контртіла (в процесі тертя температура досягала 270°C) і перенесення (налипання) оксидів заліза на поверхню зразка із покриттям. В даному випадку реалізується в основному адгезійний механізм зношування.

Процес зношування покриття з інтерметаліду NiAl з добавкою 5% CrB₂ полягає в захопленні матеріалу покриття із матеріалом контртіла. Структура поверхні тертя NiAl-5%CrB₂ за даними МРСА складається із двох фаз на основі заліза (рис. 3, II-a): сіра фаза містить в собі 64% Fe, 14% W, по 4% Ni та Cr, 15% O. Це обумовлено перенесенням оксидів матеріалу контртіла на поверхню покриття. Для утворення оксидів Ni і Al потрібні більш високі температури. У білій фазі зафіксовано 83% Fe, 10% W та 5% Ni, що свідчить про інтенсивне перенесення матеріалу контртіла на поверхню покриття. Отже, для покриття, що містить 5%CrB₂ реалізуються адгезійний та адгезійно-окисний механізми зношування. Вочевидь, введення такої кількості твердої фази, хоча і підвищує зносостійкість інтерметаліду у 3 рази, але не запобігає захопленню матеріалу покриття з матеріалом контртіла.

Для покриття NiAl-15% CrB₂ при випробуваннях при $T=20^{\circ}\text{C}$ характерним є збереження вихідної структури покриття (рис. 1) без інтенсивного намазування на поверхню покриття матеріалу контртіла (рис. 3, III-a). За даними МРСА, виконаного по полю поверхні тертя,

структура поверхні містить 63 % Ni, 24 % Al, 6 % Cr і лише 2 % Fe та 3 % O. Для даного покриття реалізується абразивний характер зношування.

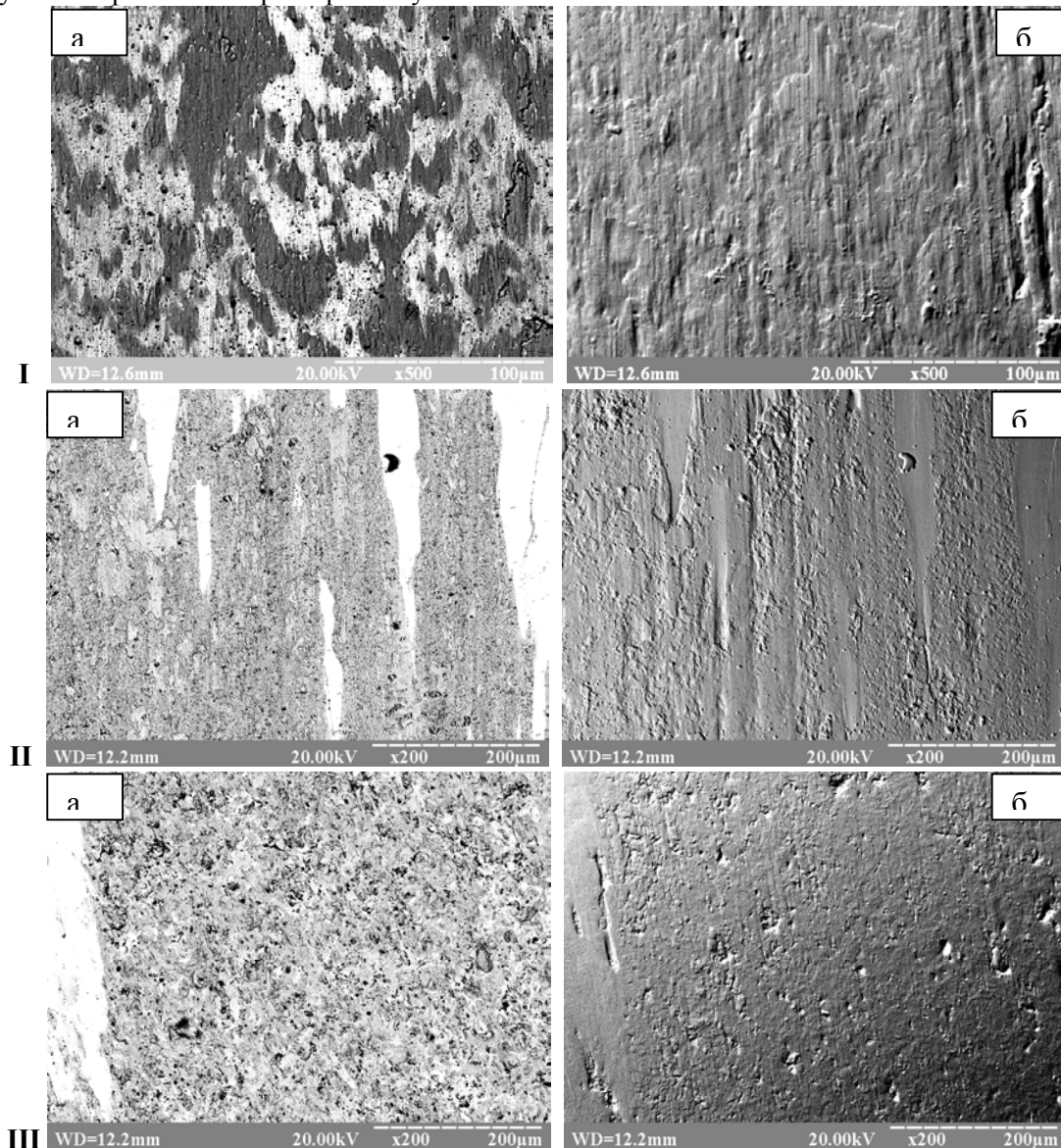
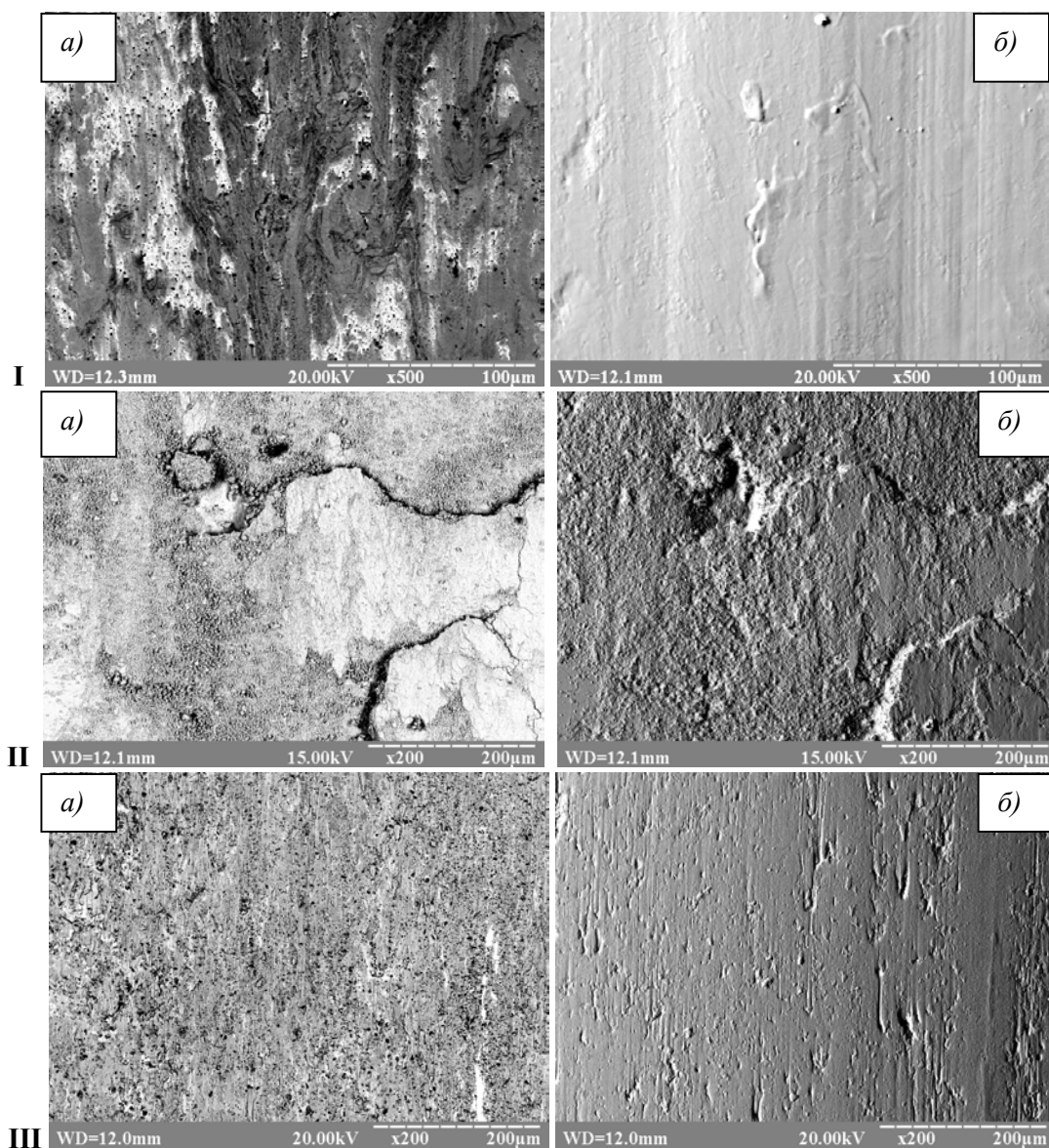


Рис. 3. Поверхні тертя плазмових покриттів I – NiAl, II – NiAl-5%CrB₂, III – NiAl-15%CrB₂ при випробуваннях в парі з контртілом Р-18 (Т= 20°С): а) мікроструктура, б) топографія

Таким чином, спостерігається наступна закономірність у механізмах зношування: з підвищенням вмісту тугоплавкої складової зменшується схоплювання між матеріалом покриття та матеріалом контртіла, що призводить до суттєвого підвищення зносостійкості.

Вплив складу покриттів на характер їх зносу при початковій температурі випробувань $T=500^{\circ}\text{C}$. Зона тертя покриття NiAl при випробуваннях при $T = 500^{\circ}\text{C}$ характеризується наявністю двох фаз: світлої і темної (рис. 4, I-а). Згідно з даними МРСА дані фази складаються з оксидів Fe, Ni і Al, але у світлій фазі вміст заліза в два рази більше, ніж у темній фазі та практично відсутні Ni і Al. Очевидно, що в результаті попереднього підігріву на поверхні тертя формується оксидна плівка на основі Ni і Al, а в процесі тертя відбувається інтенсивне перенесення оксиду заліза із контртіла на поверхню покриття, його налипання на поверхню тертя покриття. Для цього випадку характерний окисно-адгезійний механізм зношування.

Для покриття NiAl-5% CrB₂ характерним є часткове збереження структури вихідного композиційного покриття, але при цьому присутнє окиснення поверхні покриття та контртіла, взаємодія продуктів тертя з наступним налипанням на поверхню покриття. За даними МРСА поверхня тертя містить Fe, Ni, Cr, Al та O. Механізм зношування даного покриття також є окисно-адгезійним. Топографія поверхні тертя (рис. 4, II-б) дає більш повну картину пошкоджень.



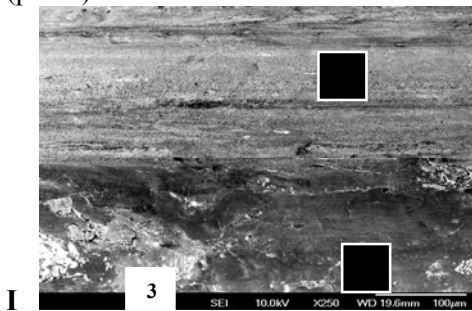
**Рис. 4. Поверхні тертя плазмових покриттів I – NiAl, II – NiAl-5%CrB₂, III – NiAl-15%CrB₂ при випробуваннях в парі із контртілом Р-18 (Т= 500°С):
а) мікроструктура, б) топографія**

На поверхні покриття NiAl-15% CrB₂ згідно МРСА фіксуються в основному фази на основі Al, Ni, Cr та O. Мабуть, оксидні плівки, що утворюються в процесі тертя, запобігають інтенсивному схоплюванню матеріалу покриття з контртілом. Поверхні тертя без значних зон ушкодження (рис. 4, III-б). Для даного покриття характерним є окисний механізм зношування.

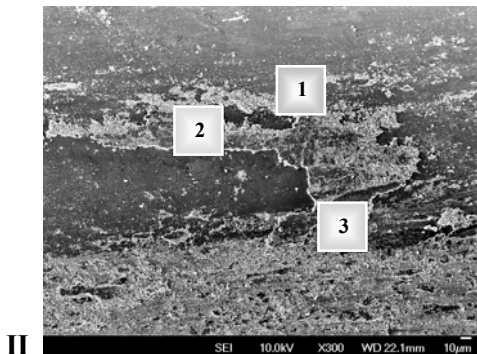
Для більш детального пояснення процесів утворення оксидних фаз в процесі трибовипробувань, додатково були проведені дослідження поверхонь тертя за допомогою мікроаналізатора Jeol Jamp – 9500F. Результати досліджень наведено на рис. 5.

Отже, на відміну від випробувань при Т=20°С, де основним є адгезійний механізм зношування, при високотемпературних випробуваннях переважним є окисний механізм зношування. Крім того, варто зазначити, що окрім температури випробувань, на процеси утворення оксидів також впливають склад та структура покриття. В процесі тертя, окисні плівки утворюються як на самій матриці, так і на зернах боридів. Останні, через свою твердість, зношуються менш інтенсивно, ніж матриця. Тобто, в першу чергу працюють окисні плівки, утворені на боридах. По мірі їх росту, вони відшаровуються та виносяться із зони тертя. Під час високотемпературних випробувань, утворення таких плівок відбувається більш інтенсивно в порівнянні з випробуваннями при Т=20°С, що в кінцевому результаті сприяє підвищенню

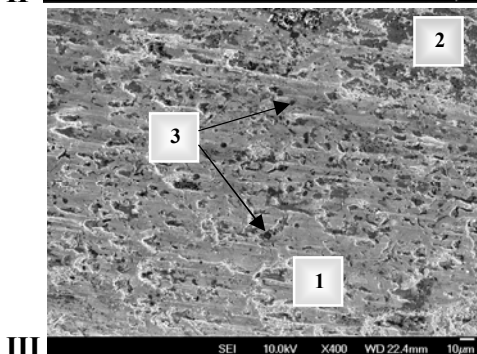
зносостійкості. Дане пояснення корелює з результатами інтенсивності зношування покриттів (рис.2).



Спектр	O	Al	Fe	Ni
1	27.97	12.39	18.54	32.92
2	31.80	14.92	16.33	28.56
3	30.39	1.53	42.35	4.93



Спектр	B	O	Al	Cr	Fe	Ni
1	0.00	27.90	1.85	2.62	47.37	6.96
2	0.43	29.70	4.79	2.81	41.54	15.41
3	0.00	9.74	14.54	1.27	8.91	61.99



Спектр	B	O	Al	Cr	Fe	Ni
1	24.08	0.39	0.13	68.0	0.75	2.69
2	0.00	28.52	5.20	3.85	33.95	15.30
3	1.39	1.01	17.73	3.91	0.42	74.22

а)

б)

Рис. 5. Мікροаналіз поверхонь тертя та плазових покриттів: I – NiAl, II – NiAl-5%CrB₂, III – NiAl-15%CrB₂ при випробуваннях в парі із контртілом Р-18 (T= 500°C): а) структура; б) хімічний склад

Отримані результати дослідження також можна пояснити наступним чином: оскільки NiAl має теплопровідність близько 70-80 Вт/м·К, а CrB₂ – 31,8 Вт/м·К, то, можна припустити, що в процесі трибовипробувань, завдяки порівняно високій теплопровідності інтерметаліду із зони тертя тепло активно йде у вузли машини тертя, сповільнюючи при цьому процес утворення оксидів. У разі додавання до інтерметаліду 5% CrB₂ картина зносу змінюється не сильно, так як частка боридів на поверхні тертя покриття низька, і тепловідвід із зони тертя залишається все ще досить інтенсивним.

При додаванні до інтерметаліду 15% CrB₂ кількість боридів на поверхні тертя покриття суттєво збільшується. Тобто, в процесі тертя бере участь не тільки інтерметалідна матриця, а й тугоплавкі зносостійкі частинки. Такі частинки мають теплопровідність набагато меншу, ніж матриця, а отже тепло в таких зернах накопичується в набагато більших кількостях. Це позитивно позначається на утворенні оксидних плівок на боридах і біля них. Ці плівки є захисними і запобігають схоплюванню покриття з матеріалом контртіла на даних ділянках. Крім того, при збільшенні кількості тугоплавкої складової збільшується число боридів, задіяних у процесі тертя, а це, завдяки гарній зносостійкості останніх, також сприяє зменшенню зносу покриття.

Логічним припущенням є те, що в разі додавання до інтерметаліду 30% CrB₂, знос такого покриття буде набагато меншим, оскільки процес утворення оксидів повинен бути більш інтенсивним через низьке тепловідведення. Однак, слід врахувати, що з підвищенням вмісту

тугоплавкої складової, збільшується крихкість матеріалу, що в процесі тертя може призвести до викришування зерен твердої фази.

Висновки. Досліджено вплив температури випробувань на триботехнічні характеристики плазмових покриттів. Встановлено, що при $T=20^{\circ}\text{C}$ для покриттів NiAl та NiAl-5% CrB₂ реалізується, переважно, адгезійний механізм зношування за рахунок схоплювання матеріалу контртіла з матеріалом покриття. При $T=500^{\circ}\text{C}$ для зазначених покриттів переважним є окисно-адгезійний механізм зношування.

Для покриття NiAl-15% CrB₂ при $T=20^{\circ}\text{C}$ реалізується механічний характер зношування, а при $T=500^{\circ}\text{C}$ – окисний. Утворення оксидів призводить до підвищення зносостійкості покриття.

Досліджено вплив кількості тугоплавкої складової на зносостійкість розроблених покриттів. Показано, що при введенні 5% дибориду хрому до складу вихідного інтерметаліду, несуттєво підвищується його зносостійкість. За результатами проведених досліджень встановлено, що оптимальним вмістом дибориду хрому в композиційному покритті на основі NiAl є 15% CrB₂. Введення такої кількості CrB₂ суттєво підвищує зносостійкість інтерметаліду.

1. *В.П. Мигунов, Д.П. Фарафонов, М.Л. Деговец, Т.И. Ступина // Уплотнительные материалы для проточного тракта ГТД [Електронний ресурс]: ВИАМ/2012-206075 / Авиационные материалы и технологии. – 2012, – 9 с. Режим доступу до журн.: www.viam.ru/public.*
2. *Уманский А.П., Полярус Е.Н., Костенко А.Д., Терентьев А.Е. / Влияние состава покрытий на основе интерметаллидов никеля на механизмы их изнашивания в условиях высокотемпературных трибоиспытаний // Проблемы трибологии. – 2012. – № 3. – С. 123-127.*

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013.