

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ім. І. М. Францевича

УКРАЇНЕЦЬ МАКСИМ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 620.22:621.763:621.793:620.186:620.178.16

**ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА
ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТІВ СИСТЕМ NiAl-MeV_2 ДЛЯ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ**

Спеціальність 05.02.01 – Матеріалознавство

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича НАН України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Уманський Олександр Павлович,
Інститут проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ,
завідувач відділу матеріалознавства
та інженерії високостійких поверхневих шарів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Роїк Тетяна Анатоліївна,
в. о. завідувача кафедри технології поліграфічного виробництва
Видавничо-поліграфічного інституту
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»
МОН України, м. Київ

доктор технічних наук, професор
Сухова Олена Вікторівна,
професор кафедри експериментальної фізики та фізики металів
Дніпровський національний університет ім. О. Гончара
МОН України, м. Дніпро

Захист відбудеться «_____» _____ 2017 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.207.03 Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України за адресою: 03680, Київ-142, вул. Крижанівського, 3.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України за адресою: 03680, Київ-142, вул. Крижанівського, 3.

Автореферат розісланий «_____» _____ 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої Вченої ради

О. В. Хоменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з найбільш актуальних напрямків розробки нових композиційних порошкових матеріалів (КПМ) є створення композитів, здатних працювати в якості покриттів в умовах високотемпературного тертя. NiAl – серійний інтерметалід, який широко використовується в авіаційній промисловості в якості жаростійких покриттів. Порівняно з типовими жаростійкими сплавами на основі нікелю даний інтерметалід має низьку густину, високу температуру плавлення та корозійну стійкість, завдяки формуванню на поверхні алюмініду нікелю за $T \geq 500$ °C захисних оксидних плівок. Дані суцільні плівки захищають інтерметалід від проникнення до нього кисню. Проте, у високотемпературних вузлах тертя оксидні плівки руйнуються внаслідок високої пластичної деформації NiAl. Це призводить до схоплювання в трибопарах, що є неприпустимим. Тому NiAl не використовується в якості зносостійких покриттів у високотемпературних вузлах тертя. Зменшити пластичну деформацію алюмініду нікелю за високих температур можна шляхом додаткового введення в його склад зносостійких тугоплавких сполук.

Сферою застосування композиційних покриттів на основі NiAl є створення зносостійких шарів на високотемпературних торцевих ущільненнях, а також захист торців лопаток в газотурбінних двигунах із контролем кліренсу, які працюють за температур до 800 °C. Для захисту поверхонь торцевих ущільнень та торців лопаток використовуються як промислові матеріали від Oerlicon Metco чи Castolin Eutectic, так і розробки науковців, в тому числі – В. І. Большакова, В. І. Харченко, Д. Віттенбергера та М. Рамазані. В якості зміцнюючої фази в таких композитах використовуються переважно оксиди. Проте, оксиди є неоптимальною зміцнюючою фазою для зміцнення NiAl внаслідок їх низької змочуваності. Внаслідок цього вони утримуватимуться в композиційних матеріалах (КМ) переважно за рахунок зв'язків механічного характеру. У процесі тертя оксиди вириватимуться із об'єму інтерметаліду, підвищуючи знос КПМ.

Перспективними сполуками для зміцнення алюмініду нікелю є тугоплавкі дибориди цирконію, титану та хрому, які мають високі фізико-механічні та експлуатаційні характеристики.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана дисертаційна робота виконана в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України в рамках програм «Розробка фізико-хімічних принципів створення композиційних матеріалів систем (Ni,Fe)Al-Me(IV)-B₂ та покриттів із них з підвищеною корозійною стійкістю та зносостійкістю» (шифр теми – III-33-12, реєстраційний номер – 0113U000314) та «Розробка технологічних принципів отримання нових зносо- й корозійностійких газотермічних та електроіскрових покриттів системи NiAl-CrB₂ і дослідження їх поведінки в умовах високих (до $T=1000$ °C) температур» (шифр теми – III-20-16).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є створення нового композиційного матеріалу для одержання газотермічних та електроіскрових покриттів з підвищеною зносостійкістю в умовах високотемпературного тертя шляхом вибору структурних складових на базі вивчення закономірностей міжфазної взаємодії в системах «інтерметалід-тугоплавка сполука» та на основі визначення особливостей трибологічної поведінки покриттів в широкому діапазоні температур.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні **задачі дослідження:**

1. Проведення аналізу існуючих композиційних матеріалів систем «NiAl-тугоплавка сполука».
2. Дослідження методом «лежачої» каплі фізико-хімічної сумісності тугоплавкої та інтерметалідної фаз, обрання оптимального складу КПМ.
3. Встановлення впливу домішок зміцнюючої фази на пластичність NiAl шляхом визначення межі текучості та міцності на вигин композиційних матеріалів на основі алюмініду нікелю, армованого тугоплавкими сполуками, в діапазоні температур $T=20\div 800\text{ }^{\circ}\text{C}$.
4. Відпрацювання технологічних режимів нанесення композиційних покриттів і вивчення їх структури та фізико-механічних властивостей.
5. Проведення триботехнічних випробувань розроблених покриттів у діапазоні температур $20\div 800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вивчення впливу температури випробувань та кількості армуючих домішок на механізми зношування даних покриттів. Видача рекомендацій щодо застосування розроблених композиційних матеріалів та покриттів.

Об'єкт дослідження – процеси змочування, міжфазної взаємодії, структуро- і фазоутворення, високотемпературного деформування, окиснення та зношування розроблених композиційних матеріалів і покриттів системи «NiAl-CrB₂».

Предмет дослідження – закономірності впливу кількості введених домішок CrB₂ на структурно-фазовий склад та властивості КМ і покриттів на основі NiAl.

Методи дослідження: вибір компонентів КПМ на основі NiAl виконано за допомогою дослідження змочування та контактної взаємодії в системах «NiAl-ZrB₂ (TiB₂, CrB₂)» методом «лежачої» каплі; структуру, хімічний та фазовий склад капель, зон взаємодії, композитів і покриттів, поверхонь зламів, продуктів окиснення і доріжок тертя досліджували на електронних мікроскопах РЕМ-106И і JEOL JAMP-9500 та на дифрактометрі Rigaku Ultima IV; дюрOMETричний аналіз проводили на мікротвердомірі ПМТ-3; дослідження процесів фазоутворення в КМ «NiAl-15% CrB₂» проводили методом високотемпературного диференційно-термічного аналізу (ВДТА) на установці ВДТА-8М; подрібнювання і змішування порошкових сумішей здійснювали в планетарному млині «Санд-1»; гранулометричний склад отриманої шихти встановлювали на установці «SK Lazer Micron Sizer PRO 7000»; гаряче пресування здійснювали на установці СПД-120; межа текучості та міцність на вигин встановлювалися на випробувальній машині НИКИМП типу 1231-У-10; композиційні покриття наносили методами плазмового напилювання на установці УПУ-3Д та електроіскровим легуванням (ЕІЛ) на установці «Alier-52»; триботехнічні характеристики отриманих композиційних покриттів встановлювали за схемою «pin-on-disc» на машині тертя МТ-68 розробки ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Сформульовано новий підхід до створення високотемпературних зносостійких КПМ на основі NiAl, який полягає у необхідності його армування дисперсними тугоплавкими сполуками з метою зниження пластичності інтерметаліду за температур $T\geq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, запобігання руйнації захисного оксидного шару, сформованого на поверхні NiAl при терті і, як наслідок, підвищення зносостійкості отриманого композиту;

2. Вперше досліджено особливості змочування та фізико-хімічної взаємодії в системах «NiAl-ZrB₂», «NiAl-TiB₂» і «NiAl-CrB₂» і встановлено, що найбільш перспективним в якості зміцнюючої домішки для створення КПМ на базі NiAl є CrB₂, який змочується інтерметалідом з формуванням контактних кутів близько 0°, а в результаті взаємодії в системі «NiAl-CrB₂» на поверхні боридних зерен утворюється нова проміжна фаза системи Ni-Cr-B, яка підвищує міцність зв'язку між алюмінідом нікелю і диборидом хрому.

3. Показано, що введення домішок дибориду хрому до алюмініду нікелю в кількості 15÷45 мас.% призводить до значного підвищення (>3 разів) межі текучості та напруження руйнування отриманих композиційних порошкових матеріалів системи «NiAl-CrB₂» порівняно з вихідним інтерметалідом при температурах 20÷800 °С, що можна пояснити утворенням фрагментів зв'язного каркасу із частинок тугоплавких сполук в об'ємі інтерметаліду.

4. Встановлено, що дисперсне армування NiAl частинками CrB₂ змінює механізм зношування покриттів системи «NiAl-CrB₂» в умовах високотемпературного тертя із абразивно-адгезійного для вихідного інтерметаліду на окиснювальний для композиційного покриття за T=500÷800 °С та забезпечує підвищення зносостійкості покриттів із отриманих КПМ в 2-3 рази, порівняно з вихідним інтерметалідом.

Практичне значення отриманих результатів. В результаті проведених досліджень обрано склад КПМ на базі NiAl, армованих домішками CrB₂, і режими отримання плазових та ЕІЛ покриттів із високими адгезією до підкладки та триботехнічними характеристиками. Сформульовано науковий підхід при створенні високотемпературних зносостійких КПМ на базі NiAl з домішками тугоплавких сполук і запропоновано рекомендації щодо використання покриттів з матеріалу НАБХ-15 у вузлах тертя, працюючих за високих температур (T=500÷800 °С). Стендові випробування в ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля» лопаток турбокомпресору турбореактивного двоконтурного двигуна, торці яких були зміцнені покриттям НАБХ-15, показали, що їх зносостійкість за T=500 °С в 1,5-1,8 разів вища, порівняно з лопатками, типовими для даної конструкції.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, належать особисто здобувачу. Автору належать: виконання наукових задач досліджень, проведення та контроль якості експериментальних випробувань, обробка результатів і їх аналіз, підготовка до друку наукових статей, організація виробничих випробувань. Планування експериментів, вибір об'єктів досліджень, постановка наукової мети та обговорення одержаних результатів виконано спільно з науковим керівником. Згідно з результатами проведених етапів досліджень здобувачем було сформульовано основні висновки щодо роботи. Робота виконана в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ. Аналіз складу і структури отриманих зон взаємодії систем «NiAl-MeB₂» виконано спільно з проф., д.т.н. Панасюк А. Д.; визначення характеристик міцності розроблених композитів на базі NiAl виконано спільно із зав.відділу, с.н.с., к.ф.-м.н. Бродніковським М. П. та с.н.с., к.ф.-м.н. Бродніковським Д. М.; триботехнічні дослідження та обговорення результатів проводились у співпраці з академіком Косторновим А. Г. та н.с. Костенко О. Д.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи представлено на 8 наукових конференціях: VI Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні та експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства і

машинобудування» (м. Луцьк, 2013 р.); Conference MET-2013: Materials, Environment, Technology (м. Рига, 2013 р.); 22th International Baltic Conference of Engineering Materials & Tribology (м. Рига, 2013 р.); XIX Міжнародному конгресі двигунобудівників (м. Харків – м. Коблеве, 2014 р.); E-MRS 2014 Fall Meeting (м. Варшава, 2014 р.); 23rd International Baltic Conference on Materials Engineering (м. Каунас, 2014 р.); II-й Міжнародній інтернет-конференції «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій» (м. Вінниця, 2014 р.); 24th International Baltic Conference in cooperation with IFHTSE ENGINEERING MATERIALS & TRIBOLOGY «BALTMATTRIB 2015» (м. Таллінн, 2015 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано **10** наукових праць, з яких **6** статей у наукових фахових виданнях (**3** у закордонних виданнях, які входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, **1** у вітчизняному виданні, яке входить до наукометричної бази даних Scopus та переліку наукових фахових видань МОН України, **2** у вітчизняних виданнях, які входять до переліку наукових фахових видань МОН України), **4** публікації за матеріалами доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, узагальнень, висновків, списку використаних джерел із 173 найменувань і 3 додатків. Робота викладена на 6 авторських аркушах і містить 63 рисунки і 18 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, показано зв'язок роботи з науковими планами та темами, сформульовано мету, задачі і методи досліджень, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У **першому** розділі проаналізовано переваги та недоліки алюмініду нікелю як матеріалу для отримання високотемпературних зносостійких покриттів. Встановлено, що NiAl не застосовується у вузлах тертя, які працюють за підвищених температур, тому що інтерметаліду властива інтенсивна пластична деформація за $T \geq 500$ °C. Така деформація алюмініду нікелю призводить до руйнування оксидних плівок, утворених на його поверхні, та, як наслідок, до схоплювання компонентів контактної пари тертя. Тобто – реалізується адгезійний механізм зношування, який є неприпустимим. Крім цього, уламки зруйнованих оксидних плівок також працюють як абразив в зоні тертя, підвищуючи знос компонентів трибопари. Розглянуто основні методи зміцнення NiAl з метою зниження його пластичної деформації за підвищених температур. Оптимальним є зміцнення інтерметаліду шляхом його дисперсного армування частинками тугоплавких сполук (ZrB_2 , TiB_2 і CrB_2). Визначено, що розроблювані композити систем «NiAl-MeB₂» перспективно застосовувати для захисту робочих поверхонь високотемпературних торцевих ущільнень і торців лопаток в парах тертя «торець лопатки-корпус ГТД» в газотурбінних двигунах з контролем кліренсу. Показано, що дані вузли працюють в умовах тертя без використання мастила за температур 20÷800 °C. Результати проведеного аналізу посприяли визначенню мети і завдань дослідження та розробці структурної схеми даної роботи (рис. 1).

У **другому** розділі наведено методики дослідження, описано характеристики обладнання і вихідних матеріалів.

Вибір зміцнюючої домішки для NiAl проводився шляхом дослідження кінетики змочування і міжфазної взаємодії методом «лежачої» каплі із використанням спечених підкладок з ZrB_2 , TiB_2 і CrB_2 .

Температурні діапазони проходження фазових перетворень в КМ «NiAl-15% CrB_2 » визначалися методом ВДТА на установці ВДТА-8М в середовищі гелію за температур 20÷1850 °C. Швидкість нагрівання становила 40 °C/хв.



Рис. 1. Структурна схема роботи.

Порошкову шихту для отримання КМ та сумішей для нанесення композиційних покриттів отримували шляхом змішування вихідних порошків NiAl та CrB_2 в планетарному млині протягом 1 години в середовищі спирту. Змішану шихту сушили і просіювали.

КМ отримували шляхом гарячого пресування (ГП) за температури 1340÷1400 °C при навантаженні 10 МПа на протязі 5 хвилин на установці СПД-120 без використання захисної атмосфери.

Межа текучості ($\sigma_{0,2}$) визначалася при стисканні ГП зразків в камері випробувальної машини НИКИМП типу 1231-Y-10 на відкритому повітрі в діапазоні температур 20÷800 °C.

Міцність зразків на вигин ($\sigma_{зг}$) визначалася шляхом їх вигинання при кімнатній (20 °C) та підвищених (500, 800 °C) температурах по 3-х точковій схемі з базою 30 мм.

Газотермічні покриття NiAl та КМ НАБХ-15 (30) наносили на сталеві зразки методом плазмового напилювання на установці УПУ-3Д. Для напилювання композиційних покриттів використовувалися суміші, конгломеровані на органічній зв'язці без подальшого спікання. Для отримання електроіскрових покриттів використовувалися електроди, вирізані із гарячеспечених композитів НАБХ-15 та НАБХ-30. Покриття наносилися шляхом електроіскрового легування сталевих зразків на установці «Alier-52».

Структура, хімічний та фазовий склад отриманих зон взаємодії, композиційних матеріалів і покриттів, поверхонь зламів, продуктів окиснення і доріжок тертя досліджувалися використовуючи електронну мікроскопію (РЕМ – 106И), РФА (Rigaku Ultima IV), МРСА і Оже-аналіз (JEOL JAMP-9500). Дюретричний аналіз проводили на мікротвердомірі ПМТ-3. Пористість композитів і нанесених покриттів та співвідношення між фазами в КМ і покриттях встановлювалися за методом січних. Адгезійну міцність зчеплення покриттів з підкладками визначали штифтовим методом.

Триботехнічні характеристики нанесених покриттів визначалися в діапазоні температур $20 \div 800$ °С за схемою «pin-on-disc» на машині тертя МТ-68, розробленій в ІПМ НАНУ, при режимах: тиск $P=2$ МПа, швидкість ковзання – $V=1,5$ м/с, дистанція тертя – $S=1000$ м.

У **третьому** розділі визначено особливості змочування і контактної взаємодії в системах «NiAl-MeB₂» методом «лежачої» каплі.

Встановлено, що дибориди цирконію, титану і хрому добре змочуються розплавом NiAl за $T=1690$ °С у вакуумі з формуванням кутів $\theta < 90^\circ$ (рис. 2). Найменший кут змочування

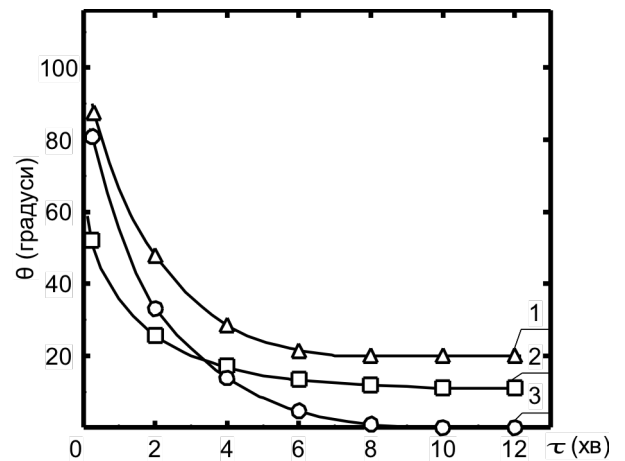


Рис. 2. Кінетика змочування в системах «NiAl-MeB₂»:
1 – NiAl-ZrB₂; 2 – NiAl-TiB₂;
3 – NiAl-CrB₂.

утворюється в системі «NiAl-CrB₂» ($\theta \approx 0^\circ$). Мікроструктура зразка даної системи складається із трьох фаз: алюмініду нікелю (рис. 3, фаза 1), дибориду хрому (рис. 3, фаза 2) та хаотично розташованих на границі зони взаємодії (ЗВ) зерен фази Ni-Cr-B (рис. 3, фаза 3). Дана фаза є нижчим боридом Cr₃B₄, легованим Ni.

З метою встановлення температурних діапазонів проходження фізико-хімічної взаємодії між NiAl і CrB₂ було проведено ВДТА порошкової суміші «NiAl-15% CrB₂» в діапазоні температур $20 \div 1850$ °С (рис. 4).

При підвищенні температури порошкової суміші до $T=1250$ °С в зонах контакту частинок

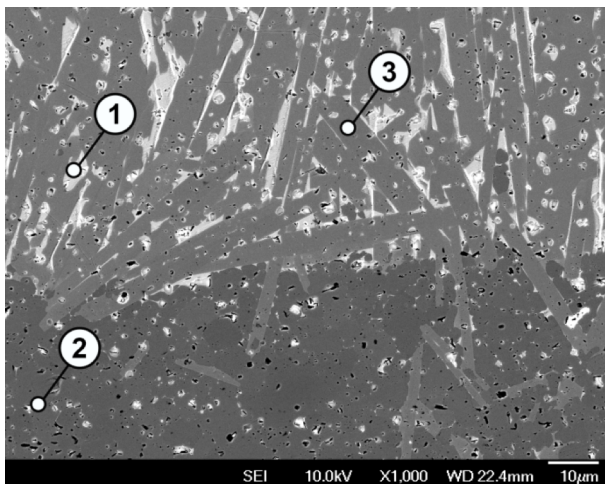


Рис. 3. Перехід між ЗВ та диборидом хрому в системі «NiAl-CrB₂»:
1 – NiAl; 2 – CrB₂; 3 – Ni-Cr-B.

дибориду хрому із алюмінідом нікелю спостерігається інтенсифікація взаємодії між NiAl і CrB₂.

При 1530 °С, очевидно, по периметру зерен CrB₂ утворюється фаза Ni-Cr-B (згідно РФА – Cr₃B₄, легований Ni). Це призводить до появи відповідного піку на термограмі (рис. 4). За 1638 °С NiAl повністю розплавився, що підтверджується кривою нагрівання (рис. 4).

При зниженні температури в камері до T=1630 °С алюмінід нікелю починає кристалізуватися. Даний процес завершується при T=1200 °С (рис. 4). Тобто даний КМ має робочі температури 20÷1000 °С.

Отриманий при спіканні композиційний матеріал «NiAl-15% CrB₂» являє собою алюмінід нікелю (рис. 5, фаза 1), в якому рівномірно розподілені частинки дибориду хрому (рис. 5, фаза 2). При цьому, зерна CrB₂ оточені фазою Ni-Cr-B (рис. 5, фаза 3). Присутність

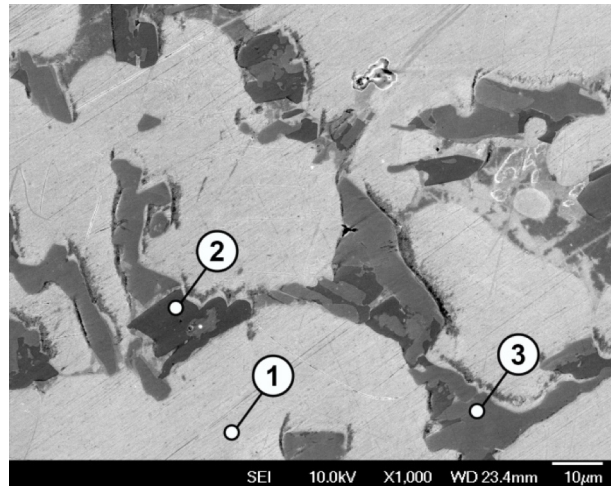


Рис. 5. Мікроструктура компактного матеріалу «NiAl-15% CrB₂»:

1 – NiAl; 2 – CrB₂; 3 – Ni-Cr-B.

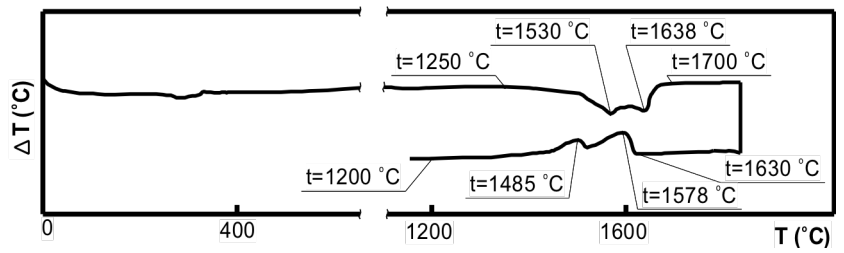


Рис. 4. Термограма системи «NiAl-15% CrB₂».

такої перехідної фази Ni-Cr-B забезпечує плавний перехід між інтерметалідом і CrB₂ та, очевидно, підвищує міцність зв'язку армуючої фази з NiAl.

В результаті дюрOMETричного аналізу матеріалу «NiAl-15% CrB₂» встановлено, що фаза Ni-Cr-B є додатково зміцнюючою, маючи мікротвердість 10,2 ГПа при мікротвердості NiAl 5,3 ГПа, CrB₂ – 19,4 ГПа.

Оптимальною зміцнюючою домішкою для створення композиту на базі NiAl обрано диборид хрому, так як він добре змочується розплавом інтерметаліду, а в результаті взаємодії алюмініду нікелю з CrB₂ утворюється додатково-армуюча фаза Ni-Cr-B.

Четвертий розділ роботи присвячено дослідженню впливу домішок CrB₂ на

характеристики міцності композиційних матеріалів на основі NiAl в широкому діапазоні температур.

Як було сказано раніше, застосування алюмініду нікелю у високотемпературних вузлах тертя є недоцільним через схильність інтерметаліду до інтенсивної пластичної деформації при температурах вище ~500 °С. Така деформація призводить до руйнування оксидних плівок, утворених на поверхні NiAl, та, як наслідок, до схоплювання елементів контактної пари тертя. При цьому реалізується адгезійний механізм зношування, який є неприпустимим. Для зменшення рівня пластичної деформації інтерметаліду при високих температурах доцільним є підвищення його характеристик міцності. Введення зміцнюючих домішок дибориду хрому до складу інтерметаліду є одним із ефективних шляхів підвищення міцності NiAl на вигин ($\sigma_{3г}$) та його межі текучості ($\sigma_{0,2}$).

Встановлення впливу кількості домішок CrB₂ в NiAl на межу текучості ($\sigma_{0,2}$) та міцність на вигин ($\sigma_{3г}$) отриманих КМ в діапазоні температур 20÷800 °С дало можливість оцінити

рівень характеристик міцності композиційних матеріалів серії «НАБХ-х» і виявити оптимальну кількість тугоплавкої фази, необхідної для підвищення міцності алюмініду нікелю за температур вище 500 °С. Діапазон температур, в якому досліджувалися КМ серії «НАБХ-х», був обраний на основі робочих температур цільового вузла тертя.

При випробуванні композиційних матеріалів серії «НАБХ-х» на вигин встановлено, що введення дибориду хрому до складу інтерметаліду призводить до значного збільшення напруження руйнування КМ у порівнянні з вихідним NiAl (рис. 6, криві 1-3). Значення σ_{3T} при температурі 20 °С для композитів НАБХ-15 і НАБХ-30 становить 480 МПа, а для НАБХ-45 – 640 МПа. При цьому, температурна залежність напруження руйнування при вигинанні композиту з 15% CrB₂ не монотонна. Максимум має місце при 500 °С і він перевищує значення, отримані для композитів з більшим вмістом бориду.

Значне підвищення напруження руйнування, яке виникло після введення до NiAl бориду, показує, що частинки CrB₂ в комплексі з фазою Ni-Cr-B створюють перешкоду розвитку руйнуючої тріщини. Це підтверджується фрактографічними дослідженнями

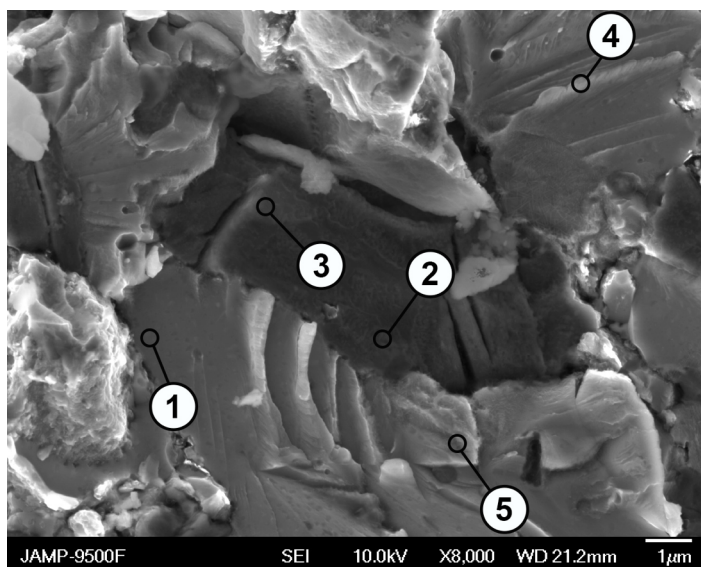


Рис. 7. Злам КМ НАБХ-15, отриманий за T=500 °С:

- 1 – NiAl; 2 – CrB₂; 3 – Ni-Cr-B;
- 4 – язики пластичної течії;
- 5 – струмкоподібний злам.

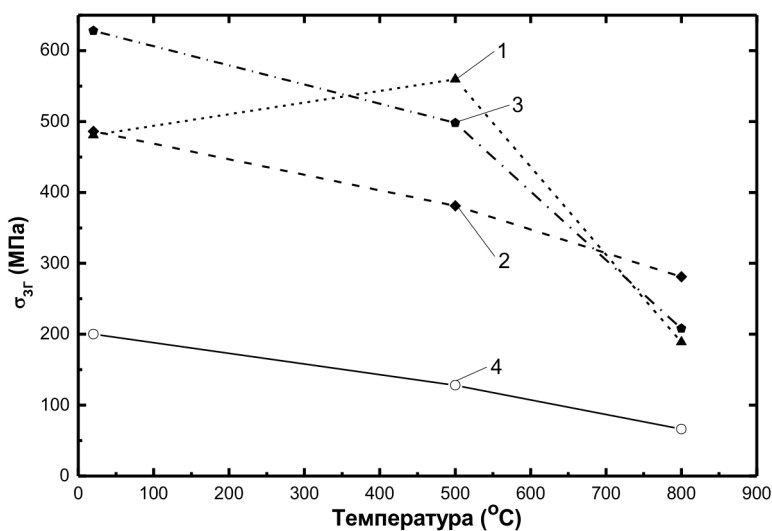


Рис. 6. Високотемпературна міцність на вигин (σ_{3T}) отриманих КМ:
1 – НАБХ-15; 2 – НАБХ-30; 3 – НАБХ-45;
4 – NiAl (літературні дані).

зламу зразка КМ НАБХ-15. На рис. 7 можна бачити скупчення ділянок, утворених при русі руйнуючих тріщин, які зупинили своє поширення досягнувши перешкоди у вигляді зерна дибориду хрому. Таким чином, зміцнююча фаза затрудняє рух дислокацій і тріщин в об'ємі NiAl в процесі руйнування зразка композиційного матеріалу. Це є причиною підвищення міцності на вигин КМ «НАБХ-х» порівняно з вихідним алюмінідом нікелю.

Оскільки КМ НАБХ-15 має вищу σ_{3T} ніж вихідний NiAl за високих температур, то даний композит має достатній рівень характеристик міцності, щоб не деформуватися інтенсивно під впливом навантажень, які діють в зоні тертя, і не спричиняти руйнування захисних оксидних плівок, утворених на поверхні фази інтерметаліду. Тобто 15% CrB₂ є

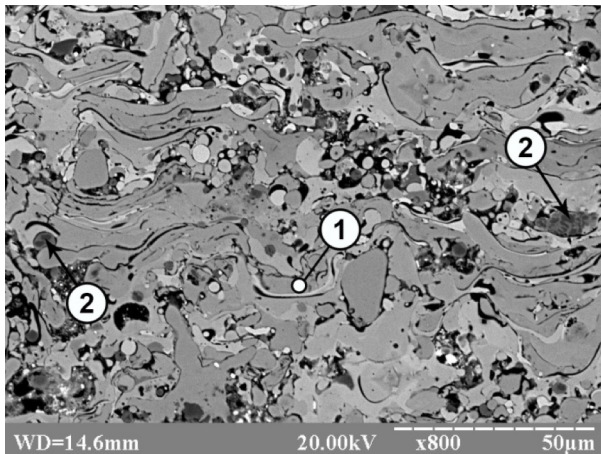


Рис. 8. Плазмове покриття НАБХ-30:
1 – ламелі NiAl; 2 – частинки CrB₂.

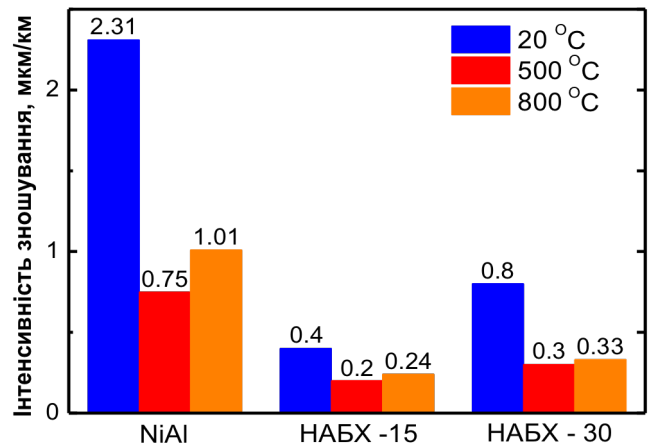


Рис. 9. Інтенсивності зношування отриманих плазмових покриттів в парі з контр-тілом Р18.

оптимальною кількістю армуючої домішки, яку необхідно ввести до алюмініду нікелю з метою використання отриманого композиту як захисного матеріалу у високотемпературних вузлах тертя ($T=20\div 800\text{ }^{\circ}\text{C}$).

У п'ятому розділі роботи наведено результати вибору оптимальних режимів нанесення плазмових та ЕІЛ покриттів НАБХ-15 (30), визначено інтенсивності зношування їх при терті за схемою «pin-on-disc» в температурному діапазоні $20\div 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ та встановлено механізми зношування.

Плазмові покриття. Плазмові покриття НАБХ-15 (30) складаються із ламелей NiAl (рис. 8, фаза 1), між якими рівномірно розподілені частинки CrB₂ (рис. 8, фаза 2).

З метою встановлення рівня зносостійкості та механізмів зношування отриманих КПМ проведено триботестування покриттів НАБХ-15 (30) за схемою «pin-on-disc» в температурному діапазоні $20\div 800\text{ }^{\circ}\text{C}$. В якості контр-тіл використовувалися диски зі сталі Р18. Для оцінки впливу домішок дибориду хрому на триботехнічні характеристики вихідного інтерметаліду додатково визначалась зносостійкість алюмініду нікелю при ідентичних режимах.

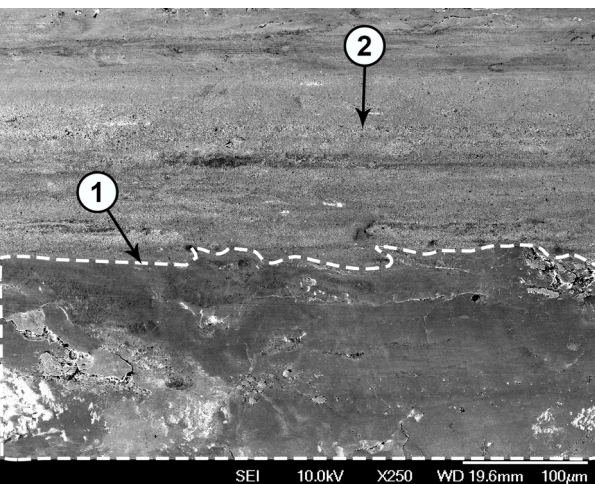


Рис. 10. Доріжка тертя плазмового покриття NiAl, отримана за $T=500\text{ }^{\circ}\text{C}$ при роботі в парі з контр-тілом Р18: 1 – перенесений матеріал контр-тіла; 2 – комплексні оксидні плівки на базі Ni, Al і Fe.

На рис. 9 наведено інтенсивності зношування плазмових покриттів при терті в парі зі сталлю Р18. Інтерметалід має найнижчий опір зношуванню в усьому діапазоні температур. Армування NiAl диборидом хрому призводить до зміцнення алюмініду нікелю та, як наслідок, росту зносостійкості композиційних покриттів НАБХ-15 (30) за температур $20\div 800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

За кімнатних температур покриття NiAl і НАБХ-15 (30) мають переважно абразивний механізм зношування.

При підвищенні температури випробування вище $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ механізм зношування NiAl змінюється на адгезійний. Значна частина доріжки тертя інтерметаліду являє собою фазу, яка за

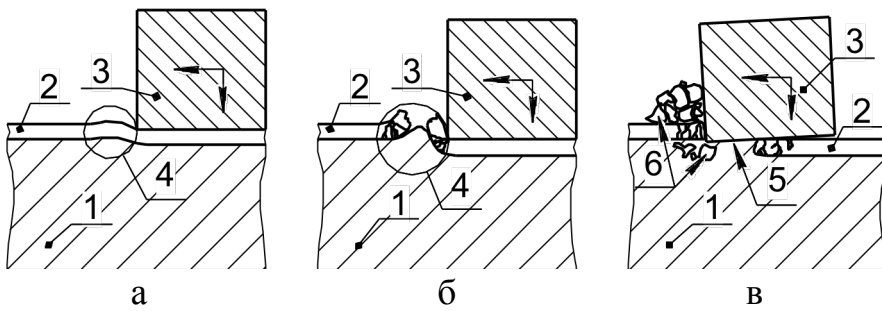


Рис. 11. Механізм тертя NiAl за високих температур:
1 – NiAl; 2 – оксидна плівка; 3 – контр-тіло;
4 – зона деформації NiAl і руйнації оксидної плівки;
5 – ділянка схоплювання матеріалів пари тертя;
6 – абразив.

NiAl₂O₄.

Таким чином, механізм зношування NiAl за високих температур є наступним. При температурах $T \geq 500$ °C на поверхні інтерметаліду формується оксидна плівка. Під впливом тиску, створюваного контр-тілом, відбувається деформація інтерметаліду, що призводить до руйнування поверхневої оксидної плівки (рис. 11), а незахищений оксидами NiAl починає схоплюватись із матеріалом контр-тіла.

При випробуваннях композиційних покриттів НАБХ-15 (30) реалізується принципово інший механізм зношування. На поверхні доріжки тертя відсутні ознаки перенесеного матеріалу контр-тіла (рис. 12). Причиною цього є декілька факторів. По-перше, поверхнева оксидна плівка (рис. 13, точка 3), утворена на NiAl, не руйнується внаслідок підвищеного опору інтерметаліду пластичній деформації за рахунок армування диборидами. По-друге, поверхня оксидної плівки, внаслідок присутності в інтерметаліді CrB₂, є не суцільною, а сегментованою. Отже, для її руйнації потрібно прикласти значно більше навантаження. Окрім того оксиди, утворені на зернах CrB₂ (рис. 13, точка 4), в процесі тертя виконують роль твердого мастила. Тобто введення дибориду хрому до об'єму алюмініду нікелю призводить до трансформації адгезійного механізму

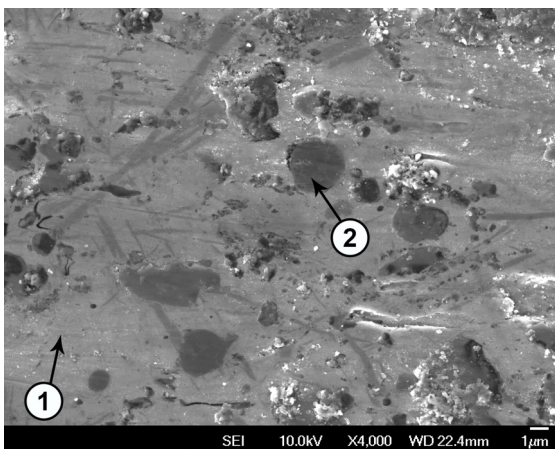


Рис. 12. Доріжка тертя НАБХ-15, отримана за $T=500$ °C при роботі в парі з контр-тілом P18:
1 – NiAl; 2 – CrB₂.

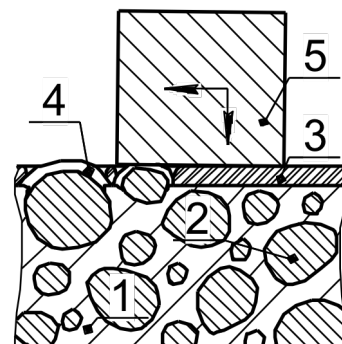


Рис. 13. Механізм тертя НАБХ-15 (30) за підвищеної температури: 1 – NiAl; 2 – CrB₂; 3 – оксидна плівка; 4 – плівка B₂O₃ (B₂O₃+Cr₂O₃); 5 – контр-тіло.

хімічним складом повністю співпадає із складом матеріалу контр-тіла. Очевидно, вона утворилася в результаті схоплювання (рис. 10, фаза 1).

Окрім зон перенесення матеріалу контр-тіла поверхня доріжки тертя вкрита комплексними оксидними плівками на базі нікелю, алюмінію та заліза (рис. 10, фаза 2). Даними оксидами є NiO, Fe₂O₃, Al₂O₃ і шпінелі

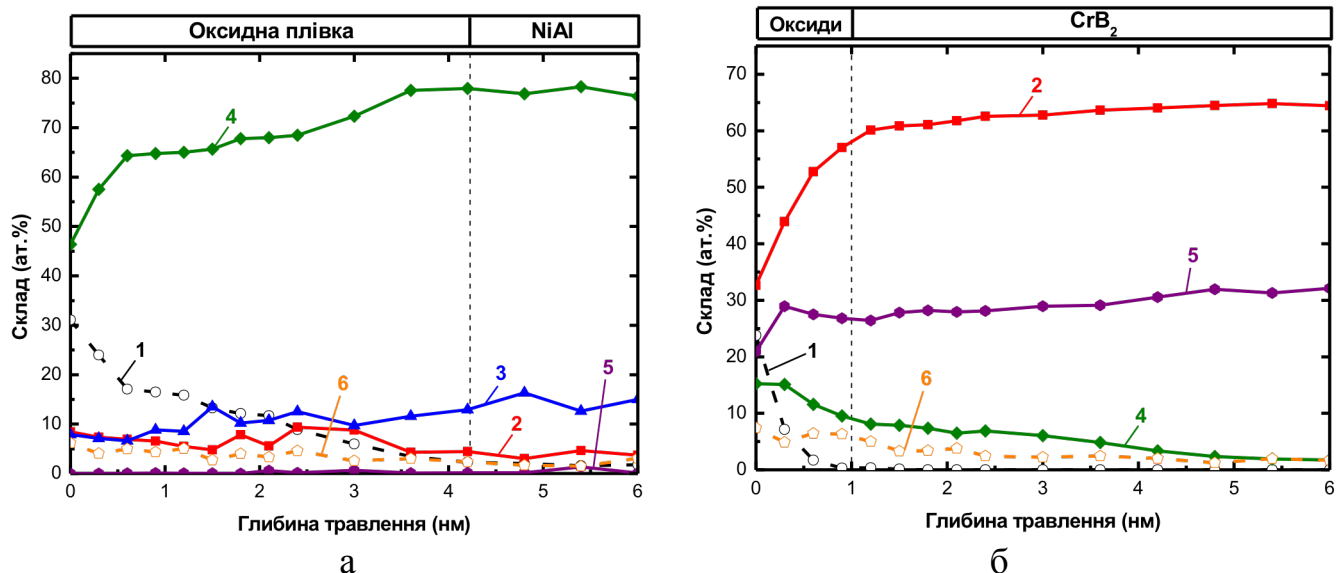


Рис. 14. Оксидні плівки, утворені на матриці (рис. 12, точка 1) (а) і зміцнюючій фазі (рис. 12, точка 2) (б) композиційного покриття НАБХ-15:
1 – O; 2 – B; 3 – Al; 4 – Ni; 5 – Cr; 6 – Fe.

зношування, характерного для вихідного NiAl, на окислювальний, характерний для композиційних покриттів.

Це підтверджується результатами дослідження доріжок тертя. Як показали дані Оже-аналізу (рис. 14), в процесі тертя композиційні покриття НАБХ-15 окиснюються селективно: на алюмініді нікелю утворилися оксиди нікелю, алюмінію та шпінелі NiAl₂O₄, а на поверхні дибориду хрому – оксиди бору або хрому.

Таким чином, можна зробити висновок, що внаслідок дисперсного армування алюмініду нікелю диборидом хрому утворюється такий рельєф поверхні, завдяки якому оксидні плівки, сформовані на поверхні CrB₂, виступають над окисненою поверхнею NiAl в складі покриття НАБХ-15. Ці оксиди сприймають основне навантаження, яке діє в зоні тертя, працюють як тверде мастило, забезпечуючи відносно низький знос композиційного покриття.

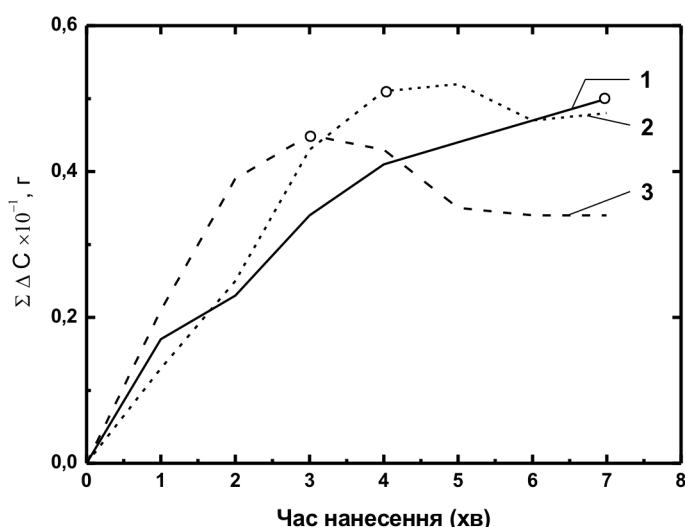


Рис. 15. Приріст маси зразку (ΣΔC) під час ЕІЛ: 1 – NiAl; 2 – НАБХ-15; 3 – НАБХ-30.

Електроіскрові покриття. При нанесенні ЕІЛ-покриття з NiAl на сталеву підкладку спостерігається плавний приріст маси покриття протягом 7 хвилин (рис. 15, крива 1). ЕІЛ-покриття NiAl характеризується численними тріщинами, що зароджуються в перехідній зоні і розвиваються в напрямку поверхні (рис. 16). Основною причиною утворення тріщин, очевидно, є залишкові напруження, як наслідок великої різниці коефіцієнтів термічного розширення NiAl ($25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) та сталі ($12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

Під час нанесення покриттів НАБХ-15 (30) приріст катоду (ΣΔК) зростає

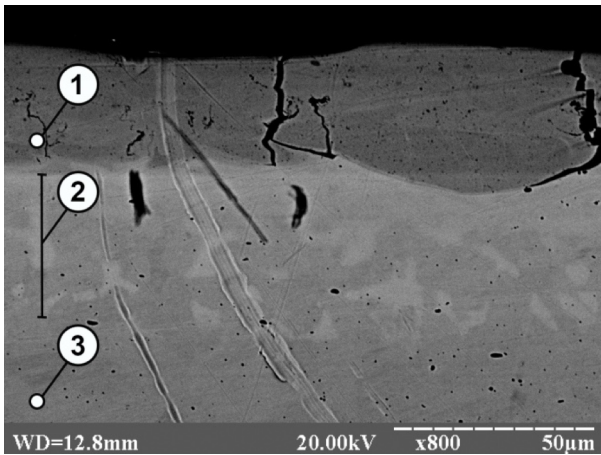


Рис. 16. ЕІЛ покриття NiAl:
1 – покриття; 2 – перехідна зона;
3 – підкладка.

Стендові випробування на державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля» лопаток турбокомпресору турбореактивного двоконтурного двигуна, торці яких були зміцнені плазовими покриттями НАБХ-15, показали їх високі експлуатаційні характеристики та зносостійкість в 1,5-1,8 разів вищу при $T=500\text{ }^{\circ}\text{C}$, порівняно з лопатками, типовими для даної конструкції.

Розроблений КПМ НАБХ-15 рекомендується використовувати для нанесення захисних покриттів на робочі поверхні деталей, що працюють в умовах високотемпературного ($T=20\div 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) тертя, в тому числі – на кільця торцевих ущільнень і торці лопаток в парах тертя «торець лопатки-корпус ГТД» в газотурбінних двигунах з контролем кліренсу.

ВИСНОВКИ

Результатом даної роботи є вирішення актуальної науково-технічної задачі створення нового КПМ на основі NiAl, армованого CrB_2 , для отримання зносо- та корозійностійких покриттів, що працюють в умовах високих температур.

1. Визначено особливості контактної взаємодії та структуроутворення в системах «NiAl-Zr (Ti, Cr) B_2 » з метою вибору оптимальної армуючої фази для створення зносо- та корозійностійкого КПМ. Найбільш перспективним зміцнюючим компонентом серед досліджених сполук є диборид хрому. Він змочується розплавом інтерметаліду з формуванням контактного кута $\theta \approx 0^{\circ}$, а внаслідок взаємодії NiAl та CrB_2 утворюється нова, додатково армуюча фаза – Ni-Cr-B.

до максимального значення після 4 (3) хв. Введення до складу NiAl домішок 15% та 30% CrB_2 запобігає утворенню тріщин шляхом релаксації вищезгаданих напружень (рис. 17). Отримані ЕІЛ покриття характеризуються щільністю в діапазоні 70÷80% та присутністю перехідної зони глибиною $\sim 30\text{ мкм}$, яка являє собою сталь, леговану Ni, Al та Cr (рис. 16 і рис. 17, ділянка 2).

При треті композиційних ЕІЛ покриттів в парі з NiAl за температур $20\div 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ отримано аналогічні рівні зносу та механізми зношування покриттів інтерметаліду і НАБХ-15 (30), що і при триботестуванні плазових покриттів (рис. 9-14).

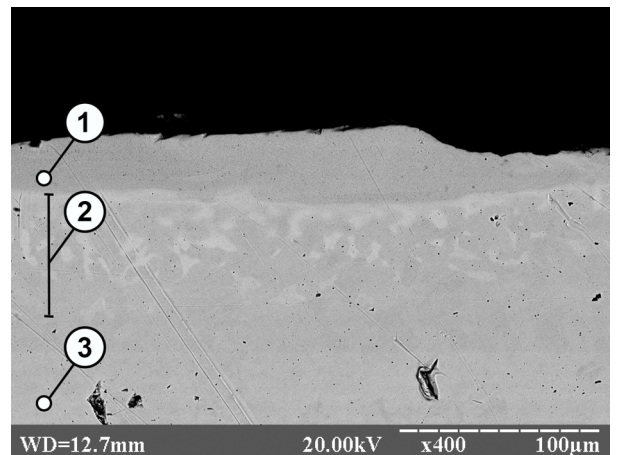


Рис. 17. ЕІЛ покриття НАБХ-30:
1 – покриття; 2 – перехідна зона;
3 – підкладка.

2. Армування інтерметаліду NiAl боридом CrB₂ підвищує характеристики міцності отриманих композитів серії «НАБХ-х» при випробуванні на стиск і вигин. Підвищується як напруження деформування при стиску, так і напруження руйнування КМ при вигині. Відсутність міжзеренного руйнування свідчить про високу адгезію на границі фаз «інтерметалід-диборид». При T=500 °C оптимальну пластичність має КМ НАБХ-15, при T=800 °C – НАБХ-30. КМ НАБХ-15 має значно вищі характеристики міцності, порівняно з вихідним інтерметалідом, в цільовому діапазоні температур 20÷800 °C.

3. КМ серії «НАБХ-х» в процесі тертя окиснюються селективно в діапазоні температур 20÷800 °C: на алюмініді нікелю утворюються оксиди нікелю і алюмінію та шпінелі NiAl₂O₄, а на поверхні дибориду хрому – оксиди бору або хрому.

4. Армування інтерметаліду домішками дибориду хрому призводить до значного зростання зносостійкості отриманих плазмових та електроіскрових композиційних покриттів, порівняно з покриттями вихідного алюмініду нікелю, при терті за температур 20÷800 °C. Введення CrB₂ змінює адгезійний механізм зношування, характерний для NiAl, на окиснювальний, характерний для покриттів НАБХ, при терті за T≥500 °C. Причиною цього є зниження пластичності інтерметаліду і, як наслідок, збереження поверхневої оксидної плівки, сформованої на алюмініді нікелю, а також робота оксидів, утворених на зернах дибориду, в якості твердого мастила в зоні тертя. Найвищу зносостійкість в усьому дослідженому діапазоні температур має матеріал НАБХ-15.

5. В результаті стендових випробувань на державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля» лопаток турбокомпресору турбореактивного двоконтурного двигуна, торці яких були зміцнені плазмовими покриттями НАБХ-15, встановлено їх високі експлуатаційні характеристики та вища в 1,5-1,8 разів зносостійкість при T=500 °C, порівняно з лопатками, типовими для даної конструкції.

6. Розроблені композиційні матеріали системи «NiAl-CrB₂» в подальшому будуть апробовані в якості детонаційних та HVOF покриттів в діапазоні температур 20÷800 °C. Планується проведення спільно з Талліннським технологічним університетом (Естонія) циклу випробувань по встановленню корозійної стійкості розроблених композиційних матеріалів та покриттів в умовах високих температур на повітрі та в агресивних середовищах. Для отриманих газо-термічних та електроіскрових покриттів буде проведено випробування в умовах інтенсивного високотемпературного газо-абразивного зносу та зроблено рекомендації по впровадженню їх до промислового виробництва.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті

1. Umanskyi, O. Physical-chemical interaction in NiAl-MeB₂ systems intended for tribological applications [Текст] / O. Umanskyi, O. Poliarus, **M. Ukrainets**, M. Antonov // Welding Journal (США, режим доступу: <https://www.scopus.com/sourceid/12040?origin=sbrowse>). – 2015. – №94. – С. 225-230.

Дисертантом досліджено особливості контактної взаємодії в системах «NiAl-MeB₂», а також фізико-хімічну взаємодію та процеси фазоутворення в системі «NiAl-CrB₂», вивчено мікроструктуру отриманих композитів.

2. Umanskyi, O. High Temperature Sliding Wear of NiAl-based Coatings Reinforced by Borides [Текст] / O. Umanskyi, O. Poliarus, **M. Ukrainets**, M. Antonov, I. Hussainova // Materials Science (Medžiagotyra) (Литва, режим доступу: <https://www.scopus.com/sourceid/19300157032?origin=sbrowse>). – 2016. – Vol. 22, Issue 1. – С. 49-53.

Автором визначено вплив домішок тугоплавких боридів на механізми зношування плазмових покриттів систем «NiAl-CrB₂» при терті в парі з NiAl за T=500 °C.

3. Umanskyi, O. Effect of ZrB₂, CrB₂ and TiB₂ Additives on the Tribological Characteristics of NiAl-Based Gas-Thermal Coatings [Текст] / O. Umanskyi, O. Poliarus, **M. Ukrainets**, I. Martsenyuk // Key Engineering Materials (Швейцарія, режим доступу: <https://www.scopus.com/sourceid/12378?origin=sbrowse>). – 2014. – Vol. 604. – С. 20-23.

Дисертант отримав композиційні суміші для нанесення газотермічних покриттів NiAl-15 мас.% MeB₂ та визначив триботехнічні характеристики покриття NiAl-15 мас.% CrB₂ за T=500 °C.

4. Уманский, А. П. Структура и триботехнические характеристики композиционных материалов и покрытий из них на основе системы NiAl-CrB₂ [Текст] / А. П. Уманский, Е. Н. Полярус, **М. С. Украинец**, Л. М. Капитанчук // Порошковая металлургия (Україна, режим доступу: <https://www.scopus.com/sourceid/27886?origin=sbrowse>). – 2015. – №1/2. – С. 65-73.

Автором визначено вплив зміцнення алюмініду нікелю частинками дибориду хрому на триботехнічні характеристики отриманих композиційних покриттів за температури 500 °C.

5. **Українець, М. С.** Вплив температури випробувань на триботехнічні характеристики композиційних покриттів системи NiAl-CrB₂ [Текст] / М. С. Українець, О. П. Уманський, О. М. Полярус, О. В. Кущев, О. У. Стельмах // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – 2013. – №41, ч.2. – С. 206-212.

Автором досліджено триботехнічні характеристики і механізми зношування плазмових покриттів систем «NiAl-CrB₂» при їх терті зі сталлю P18 за температур 20 і 500 °C.

6. **Українець, М. С.** Закономірності нанесення та зношування електроіскрових покриттів системи «NiAl-CrB₂» [Текст] / М. С. Українець // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2016. – №2. – С. 21-27.

Дисертантом розроблено електроди для ЕІЛ, досліджено їх структуру і хімічний склад. Встановлено особливості нанесення та зношування ЕІЛ покриттів систем «NiAl-CrB₂» за T=500 °C.

Публікації за матеріалами доповідей

7. Umanskyi, O. Influence of CrB₂ additives into NiAl intermetallics on tribological properties of thermal spray coatings at high temperature friction [Текст] / O. Umanskyi, O. Poliarus, **M. Ukrainets**, O. Kostenko, O. Terentyev // Conference MET-2013: Materials, Environment, Technology – Latvia, Riga. – June 19-20, 2013. – С. 37-43.

Дисертантом досліджено вплив домішок дибориду хрому до алюмініду нікелю на особливості зношування отриманих плазмових покриттів в широкому діапазоні температур.

8. **Ukrainets, M.** The development of composite electrode materials based on NiAl intermetallic compound for electrospark alloying of steel [Текст] / M. Ukrainets, O. Umanskyi // Abstract book of the E-MRS 2014 Fall Meeting – Poland, Warsaw. – September 15-19, 2014. – С. 51.

Автором розроблено електроди, досліджено структуру, хімічний склад та особливості зношування ЕІЛ покриттів систем «NiAl-CrB₂» за T=500 °C.

9. Umanskyi, O. Sliding wear of NiAl-based coatings reinforced by borides [Текст] / O. Umanskyi, O. Poliarus, **M. Ukrainets**, I. Hussainova, M. Antonov // Abstract book of the 23rd International Baltic Conference on Materials Engineering – Lithuania, Kaunas. – October 23-24, 2014. – С. 85.

Дисертантом досліджено вплив домішок боридів Cr на механізми зношування плазових покриттів на базі NiAl при терті за T=500 °C.

10. Полярус, О. М. Вплив методу конгломерації композиційних порошкових сумішей на зносостійкість плазових покриттів, отриманих на базі даних сумішей [Текст] / О. М. Полярус, **М. С. Українець** // Тези доповідей II-ої Міжнародної інтернет-конференції “Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій” (ВНТУ, Вінниця, 12 листопада 2014) Частина 1. – Вінниця, ВНТУ. – Листопад 12, 2014. – С. 36.

Автором досліджено вплив методу виготовлення порошкової шихти на особливості зношування ГТН покриттів за кімнатної температури в парі з NiAl.

АНОТАЦІЯ

Українець М. С. Особливості структуроутворення та експлуатаційні властивості композитів систем NiAl-MeB₂ для високотемпературних зносостійких покриттів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство. – Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, 2017.

Робота присвячена розробці нових КПМ на основі NiAl, дисперсно армованого диборидом хрому, для зносостійких покриттів, призначених для роботи в умовах високотемпературного тертя (T≤800 °C).

Вибір зміцнюючої домішки зроблений на основі визначення кінетики змочування та контактної взаємодії в системах «NiAl-ZrB₂», «NiAl-TiB₂» та «NiAl-CrB₂».

Диборид хрому обрано оптимальною армуючою домішкою внаслідок його високої змочуваності розплавом інтерметаліду (θ≈0°) та утворенням, в результаті взаємодії з NiAl, додатково армуючої фази системи Ni-Cr-B.

Використовуючи високотемпературний диференційно-термічний аналіз встановлено, що процеси фазоутворення в системі «NiAl-15% CrB₂» протікають за T≥1200 °C, тобто КПМ на базі інтерметаліду, армованого диборидом хрому, придатні до роботи за температур до 800 °C.

Отримані композити НАБХ-15 (30, 45) (складу NiAl-15%, 30% і 45% CrB₂ відповідно) мають гетерофазну структуру: зміцнююча фаза рівномірно розподілена в об'ємі інтерметаліду. Введення дибориду хрому в об'єм алюмініду нікелю знижує пластичність, значно підвищує міцність та зносостійкість, змінює механізми окиснення та зношування отриманих КМ (КПМ), порівняно з вихідним NiAl, в діапазоні температур 20÷800 °C. Найвищий опір зношуванню в умовах тертя ковзання за схемою «pin-on-disc» за T≤800 °C мають покриття НАБХ-15.

Ключові слова: NiAl, CrB₂, тугоплавка сполука, дисперсне армування, композиційний порошковий матеріал, змочування, міжфазна взаємодія, високі температури, деформація,

міцність, окиснення, плазмове покриття, електроіскрове покриття, зносостійкість, високотемпературне тертя.

Украинец М. С. Особенности структурообразования и эксплуатационные свойства композитов систем NiAl-MeB₂ для высокотемпературных износостойких покрытий. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – Материаловедение. – Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, 2017.

Работа посвящена разработке новых КПМ на основе NiAl, дисперсно армированного диборидом хрома, для износостойких покрытий, работающих в условиях высокотемпературного трения ($T \leq 800$ °C).

Серийный интерметаллид NiAl широко используется в авиационной промышленности в качестве коррозионностойких покрытий. Однако, использование покрытий алюминида никеля у высокотемпературных узлов трения является ограниченным из-за высокой пластичности NiAl при $T = 500$ °C.

С целью снизить пластичность интерметаллида и сделать покрытия на основе NiAl пригодными к работе в условиях высокотемпературного трения алюминид никеля упрочнялся путем введения частиц тугоплавких диборидов. Выбор упрочняющей добавки сделан на основе определения кинетики смачивания и контактного взаимодействия в системах «NiAl-ZrB₂», «NiAl-TiB₂» и «NiAl-CrB₂».

Диборид хрома выбран оптимальной армирующей добавкой благодаря его высокой смачиваемости расплавом интерметаллида ($\theta \approx 0^\circ$) и образованию, в результате взаимодействия с NiAl, дополнительно упрочняющей фазы системы Ni-Cr-B. Данная фаза образовывается по периметру зерен CrB₂ и положительно влияет на прочность связи между добавками диборида и интерметаллидом.

Используя высокотемпературный дифференциально-термический анализ установлено, что процессы фазообразования в системе «NiAl-15% CrB₂» протекают при $T \geq 1200$ °C. Это свидетельствует о том, что КПМ на базе интерметаллида, армированного диборидом хрома, пригодны к работе при температурах до 800 °C.

Полученные композиты НАБХ-15 (30, 45) (состава NiAl-15%, 30% и 45% CrB₂ соответственно) имеют гетерофазную структуру: упрочняющая фаза равномерно распределена в объеме интерметаллида.

Влияние добавок диборида хрома на пластичность композиционных материалов на основе алюминида никеля устанавливалось путем определения предела текучести и прочности на изгиб композитов НАБХ при температурах 20, 500 и 800 °C. При введении CrB₂ в NiAl в количестве выше 12% в объеме интерметаллида образуются фрагменты каркаса из зерен тугоплавких соединений, который повышает сопротивление к пластической деформации и прочностные характеристики полученных композитов НАБХ.

Влияние введения диборида хрома в объем алюминида никеля на износостойкость полученных композиционных покрытий определялась путем проведения трибоиспытаний плазменных и электроискровых покрытий НАБХ-15 и НАБХ-30 по схеме «pin-on-disc» при температурах 20, 500 и 800 °C. Введение CrB₂ в интерметаллид приводит к значительному повышению износостойкости полученных композиционных покрытий

НАБХ. Упрочнение диборидами приводит к смене адгезионного механизма изнашивания, характерного для серийного NiAl, на окислительный механизм изнашивания, свойственный для полученных композиционных покрытий НАБХ при температурах $T \geq 500$ °C. Наивысшее сопротивление изнашиванию в условиях трения скольжения по схеме «pin-on-disc» при $T \leq 800$ °C имеют покрытия НАБХ-15.

Разработанный композиционный материал НАБХ-15 рекомендуется использовать для нанесения при помощи газотермического напыления или электроискрового легирования износостойких покрытий, работающих в условиях трения при температурах $T = 20 \div 800$ °C.

Ключевые слова: NiAl, CrB₂, тугоплавкое соединение, дисперсное армирование, композиционный порошковый материал, смачивание, межфазное взаимодействие, высокие температуры, деформация, прочность, окисление, плазменное покрытие, электроискровое покрытие, износостойкость, высокотемпературное трение.

Ukrainets M. S. Structure Formation Features and Operational Properties of NiAl-MeB₂ System Composites for High-Temperature Wear-Resistant Coatings. – Manuscript.

Candidate's degree thesis of engineering sciences on specialty 05.02.01 – Material science. – Frantsevich Institute for Problems of Material Science of National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to a development of new NiAl-based composite materials armored by chromium diboride particles for obtaining of wear resistant coatings aimed to work under high temperature sliding ($T \leq 800$ °C).

Reinforcement selection was made according to wetting kinetics and contact interaction determined in “NiAl-ZrB₂”, “NiAl-TiB₂” and “NiAl-CrB₂” systems.

Chromium diboride was selected as an optimal reinforcement additive due to both its good wettability with intermetallic melt ($\theta \approx 0^\circ$) and Ni-Cr-B system phase formation. Ni-Cr-B phase is an additional armoring phase.

Using High-temperature Differential Thermal Analysis was determined that processes of phase formation appears at $T \geq 1200$ °C. Hereby intermetallic-based composites armored by chromium diboride are suitable for work under high temperatures (up to 800 °C).

Obtained composites NiAl – 15% (30%, 45%) CrB₂ have heterogeneous microstructure with chromium diboride particles uniformly distributed in the intermetallic matrix. CrB₂ addition both leads to decreasing of NiAl plasticity and changes oxidation- and wear mechanisms of intermetallic. Composites of «NiAl-CrB₂» systems have lower plasticity, higher strength and wear resistance comparing to initial nickel aluminum at 20÷800 °C. The highest wear resistances under sliding at $T \leq 800$ °C have NiAl-15% CrB₂ coatings.

Key words: NiAl, CrB₂, refractory compound, dispersive armoring, composite material, wetting, phase interaction, high temperature, deformation, strength, oxidation, plasma coatings, electro-spark deposited coatings, wear resistance, high-temperature sliding.

Підписано до друку 17.12.2017. Формат 60x90/16
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,8
Тираж 100 прим. Замовлення № 130

Дільниця оперативної поліграфії Інституту проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича НАН України
03680, м. Київ-142, вул. Кржижанівського, 3.