

УДК 629.083

DOI: 10.18372/0370-2197.2(95).16560

С. Д. ХАРЧЕНКО

Інститут загальної енергетики НАН України

**ФОРМУВАННЯ ЖАРО-ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ  
СИСТЕМИ Ni-Al-Ti-C-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O**

*Розкрито закономірності формування жаро-зносоустійких покриттів системи Ni-Al-Ti-C-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O та наведено результати їх дослідження при навантаженні тертям. Запропоновані покриття відрізняються тим, що мають на порядок вищу стійкість до окислення у порівнянні з традиційними жаростійкими покриттями, при цьому відрізняються високими показниками зносоустійкості. У всьому діапазоні випробувань показники інтенсивності зношування залишаються практично незмінними, та значно нижчі від традиційно застосовуваних зносоустійких матеріалів. При зміні швидкості ковзання в умовах підвищених навантажень та температур інтенсивність зношування залишається практично незмінною і вдвічі менша у порівнянні з покриттями карбиду вольфраму.*

**Ключові слова:** жаро-зносоустійкі покриття, стійкість до окислення, інтенсивність зношування, жаростійкість.

**Вступ та постановка задач дослідження.** Сучасний вибір складових та розробка якісного матеріалу для отримання покриттів з підвищеними показниками жарозносоустійкості потребує попередніх досліджень та обґрунтування асортименту компонентів для їх композицій, яка не повинна містити дефіцитних і дорогих елементів та відповідає їх оптимальній наявності в мінерально-сировинній базі України, крім того важливою умовою залишається урахування техніко-економічних факторів виробництва.

Структура матеріалу являє собою якісну характеристику взаємо розташування і взаємозв'язків його складових частин. При цьому, неорганічні матеріали покриттів являють логічно упорядковану систему взаємопов'язаних аксіоматичних доведень, які відображають суттєві співвідношення між структурою, складом, їх властивостями, та величиною внеску в підвищення якості їх експлуатації і забезпечення високого рівня надійності, в умовах підвищених температур.

Незважаючи на виключну роль, яку відіграють жарозносоустійкості покриття, до теперішнього часу наукові основи вибору їх компонентів і легування розроблені недостатньо. Більшість застосовуваних марок жарозносоустійкості покриттів було встановлено емпіричним шляхом і часто впроваджувались в практику після позитивних поодиноких досліджень, на відміну від результатів систематично проведених науково-дослідницьких робіт.

Критичний аналіз широко досліджених марок покриттів з позиції сучасного матеріалознавства показує, що багато з застосовуваних гетерогенних захисних покриттів не можуть бути визнані ні раціональними за складом, ні найкращими за властивостями. Із відомих груп матеріалів зі спеціальними фізичними і хімічними властивостями найменш вивчені покриття, що пояснюється відсутністю строгої теорії і наявністю критеріїв, які обираються для її оцінки. У зв'язку з викладеним, проблема вибору раціональної композиції покриттів з підвищеними показниками жарозносоустійкості дуже складна.

Успіхи інженерії матеріалів зокрема, триботехнічного матеріалознавства настільки значні, що є можливим, незважаючи на складність проблеми, намітити загальні принципи отримання раціональних композицій гетерогенних покриттів з підвищеними показниками жарозносоустійкості.

Значний вплив на експлуатаційні характеристики покриттів має дисперсність, зольність, наявність домішок та ін. Так, твердість, міцність, схильність до коагуляції і до утворення тріщин, інтенсивність дифузійних процесів і перетворення в тверду фазу

можуть бути різними не тільки для різних структурних складових, але й для однакових композицій в залежності від розмірів зерна. Чим дрібніше зерно, тим більшу площу займає зміцнена поверхня пограничних шарів і тим вищий повинен бути опір матеріалу.

**Аналіз останніх публікацій з даної проблеми.** В той час як питання зносостійкості та вибір оптимальних композицій покриттів досить широко розглянуто, питання жаростійкості є досить актуальним та вимагає більш глибокого вивчення. Жаростійкість пов'язана зі здатністю металів і сплавів опиратись окисленню при високих температурах. Основним фактором який впливає на жаростійкість матеріалу є його хімічний склад, який визначає захисні властивості оксидної плівки.

Незважаючи на велику кількість робіт, проведеними багаточисленними дослідженнями, залишається актуальною проблема розробки нових і модернізація традиційних методів захисту металів при впливі високих температур. Традиційні способи підвищення жаростійкості поступово втрачають свою актуальність, а нові в достатній мірі не розроблені.

Для формування жаростійких покриттів існує кілька найбільш застосовуваних груп неорганічних матеріалів. Жаростійкістю володіють метали, що утворюють щільні оксиди (оксидні плівки): Al, Zn, Sn, Pb, Cr, Mn, Be [1,2,4].

Широкого використання у якості жаростійких покриттів отримали сплави на основі заліза, нікелю, залізонікелеві сталі і сплави, леговані хромом та іншими елементами (Al, Si, Y та ін.). У покриттях на основі заліза, що містить більше 13% Cr, замість оксиду FeO утворюється більш складний оксид типу шпінелі MeO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Збільшення вмісту хрому в залізних покриттях до 25-30% підвищує їх жаростійкість, особливо при додатковому легуванні алюмінієм, кремнієм, ітрієм. Леговані оксиди заліза замінюються оксидом хрому. Чим більше вміст хрому в покритті, тим вище максимальна робоча температура та більший ресурс експлуатації виробів [1].

На виробі із жаростійких хромонікелевих сталей (20X23N18, 20X25N20C2 та ін.) і хромонікелевих сплавів (X20N80 та ін.) наносять більш високожаростійкі покриття. Поряд з додатковим поверхневим легуванням наносять зовнішні покриття. Розроблено спеціальні жаростійкі покриття із сплавів на основі системи Me-Cr-Al-Y (Ni-Cr-Al-Y; Co-Cr-Al-Y; Ni-Co-Cr-Al-Y тощо). Встановлено, що оптимальна концентрація ітрію залежить від складу сплаву і знаходиться в межах 0,08-0,35%. Позитивний вплив ітрію в малих концентраціях пов'язано з ефектом збільшення окалиностійкості. При цьому з'являється переважна орієнтація в структурі плівки; знижуються внутрішні напруження; збільшується адгезійний зв'язок плівки з металевим покриттям. Більш високі концентрації ітрію (більше 0,6 %) підвищують крихкість покриття за рахунок виділення металідної фази NiY по границі кристалітів.

Ресурс експлуатації жаростійких покриттів в значній мірі визначається товщиною захисного шару. При великих товщинах із-за збільшення загальної кількості Al і Y ресурс зростає, в той же час при певному збільшенні товщини спостерігається зниження витривалості системи. Наприклад, нанесення атомарних, конденсаційних покриттів електронно-променевим випаровуванням або іонно-плазмовим розпиленням товщиною від 40-60 мкм до 100 мкм і вище призводить до істотного зменшення границь витривалості [2].

Жаростійкі покриття на основі заліза та нікелю, легованого хромом та іншими елементами застосовуються у виробках різного призначення з широким діапазоном розмірів та неоднозначними вимогами до жаростійкості та термостійкості. Найвища якість жаростійких покриттів досягається при твердофазній схемі формування. Відомі технології виробництва напівфабрикатів (листів, полос, стрічок та ін.) з карбонових або низьколегованих сталей із жаростійкими покриттями, отриманими при спільному деформуванні (прокатці, пресуванні). Для дрібногабаритних виробів використовують оплавлення металевих порошкових композицій із самофлюсуючих сплавів (Me-Cr-Si-V). Широке застосування отримало порошкове, д्रोкове та шнурове газотермічне напилення, особливо з використанням високошвидкісних потоків напилюваних частинок.

У якості жаростійких покриттів із високими температурами експлуатації можуть бути використані сплави на основі міді (бронзи), легованої хромом, алюмінієм, берилієм, кремнієм тощо. При високотемпературній окислювальній взаємодії на поверхні утворюється міцна оксидна плівка з легуючих елементів, що має найкращі захисні властивості порівняно з оксидами міді  $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Нанесення бронзових покриттів доцільно здійснювати газотермічним напиленням. Тонкі і щільні покриття наносять конденсаційно-вакуумним осаджуванням [3].

Жаростійкість ряду металевих сполук досить висока, і для деяких з них не менше, ніж у сплавів на залізних і нікелевих основах. Широкого застосування знайшли жаростійкі покриття з алюмінієм типу  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{NiAl}$  та сплави на їх основі. Жаростійкість таких покриттів може забезпечити температуру експлуатації виробів до  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ . Захисні властивості утворює щільна оксидна плівка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Для газотермічного нанесення алюмінієвих покриттів розроблено ряд сплавів, зокрема ПН70Ю30, ПН85Ю15 та ін. Набагато менша температура окисної взаємодії характерна для металідів систем  $\text{Al-Ti}$  ( $\text{NiTi}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ,  $\text{NiTi}_2$ ) і  $\text{Ti-Ni}$  та сплавів на їх основі. Найбільш високу якість покриттів отримують конденсаційно-вакуумним осадженням з парової фази за допомогою іонного або дугового розпилення компактних мішеней. Для газотермічного напилення, в основному плазмового, застосовують стандартні порошки дисперсністю  $50\text{-}100\text{ }\mu\text{m}$  [4].

Покриття безкисневих неметалевих сполук представляють собою загальний клас неорганічних неметалічних матеріалів. До них відносяться нітриди, карбіди, бориди, силіциди, сульфідні і т.п. Найбільше застосування для жаростійких покриттів отримали металопоподібні силіциди перехідних металів. Висока стійкість до окислення обумовлена утворенням на поверхні покриття оксидних плівок, здатних до самозаліковування дефектів, викликаних умовами експлуатації. Жаростійкість силіцидних покриттів вища, ніж у розглянутих раніше неорганічних матеріалів.

Наприклад, покриття з дисиліциду молібдену  $\text{MoSi}_2$  витримують температуру до  $1600\text{ }^\circ\text{C}$ . Це дозволяє здійснювати захист від високотемпературного окислення тугоплавких металів ( $\text{W}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{Nb}$  та ін.), графіту та вуглепластиків. Найбільш поширеним технологічним процесом є силіціювання - поверхневе насичення матеріалу кремнієм з парової фази. З цією метою використовуються різні способи: безпосереднє випарювання твердого порошкового кремнію; відновлення кремнію з хлорсиланів по реакції:  $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{SiO}_2 + 4\text{HCl}$ ; осаджування парів кремнію концентрованими джерелами тепла в вакуумних камерах. В результаті взаємодії парів кремнію з матеріалом поверхні відбувається синтезування жаростійких силіцидів. Наряду з вищими силіцидами ( $\text{MoSi}_2$ ,  $\text{WSi}_2$ ,  $\text{NbSi}_2$  та ін.) можливо утворення і низьких силіцидів за загальною схемою металів:  $\text{MeSi}_2 > \text{MeSi} > \text{Me}_2\text{Si}$  [5].

Широко застосовується поверхневе силіціювання графіту та інших вуглеподібних матеріалів. Пари кремнію, осідаючи в поверхнях графіту, створюють внутрішнє газонепроникне покриття з температурою експлуатації в газових окисних середовищах, що досягає  $1750\text{ }^\circ\text{C}$  і вище.

Зовнішні силіцидні покриття можуть бути отримані конденсаційно-вакуумними методами нанесення та газотермічним порошковим напиленням. При використанні диборидів кремнію втрати одного з елементів приведуть до утворення низьких боридів.

Жаростійкі поверхні з досить високою температурою експлуатації виробів можуть бути отримані при нанесенні деяких карбідних покриттів типу КХП-30Н та подвійних карбідів хрому та титану КХТП-30Н. Випробування на жаростійкість показало високу ефективність напилених покриттів. Так, для КТН-35Н (карбід титану з нікелевою оболонкою - 35%  $\text{Ni}$ ) після витримки при температурі  $500\text{ }^\circ\text{C}$  оксидний шар практично відсутній і істотно зростає при  $700\text{ }^\circ\text{C}$  і особливо при  $900\text{ }^\circ\text{C}$  [6].

Нітриди мало придатні для жаростійких покриттів у зв'язку з їх термічною нестабільністю. Інтерес представляє нітрид кремнію  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Однак нанесення покриттів із цією сполукою пов'язано з великими труднощами через високу летючість азоту.

По своїй природі оксиди і сплави на основі оксидів найбільш ефективні для створення жаростійких покриттів. Це відноситься до оксидів, що мають високотемпературну стабільність. Мало придатні оксиди, що схильні до сублімації або істотної втрати кисню при нагріві. При створенні жаростійких поверхонь з оксидів в основному застосовують наступні схеми формування покриттів: порошкову - газотермічними методами напилення; атомарну - конденсаційно-вакуумним осадженням; оплавленням попередньо закріплених порошкових композицій.

Жаростійкі покриття з індивідуальних оксидів ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  та ін.) задовольняють тільки деяким вимогам, наприклад, температурою експлуатації або складом газового середовища. У зв'язку з цим при виборі оксидного жаростійкого покриття необхідно орієнтуватися на складні оксидні сполуки або багатокомпонентні оксидні сплави. Для практичного використання в довідкових джерелах [7] приводяться дані про фізико-хімічні властивості індивідуальних оксидів і сполук з них, а також багаточисленних багатокомпонентних сплавів.

Температура експлуатації 1000-1700 °С досягається при нанесенні жаростійких покриттів із чистих оксидів ( $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$  тощо). Для цих цілей використовують газотермічне, в основному плазмове, напилення з порошкових оксидів. Основним недоліком, властивим цим покриттям, є підвищена пористість. Для видалення нещільностей, за якими на границі розділу діє активне газове середовище, призводять до збільшення товщини покриття до 300-500 мкм і більше. При таких товщинах неможливо створити захисні поверхні з достатньою термостійкістю [8].

Кращі результати отримують, застосовуючи модифіковані оксиди або оксидні сполуки. Наприклад, діоксид цирконію модифікують невеликими добавками оксиду ітрію або іншими оксидами. У системі  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  для газотермічного напилення застосовують сполуки  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ ; в системі  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  - магнезіальну шпінель  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ; в системі  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$  - сполуки  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$  та ін. Для зменшення дефектів структури рекомендується застосовувати проміжні шари різного складу. Такі жаростійкі покриття з оксидів наносять конденсаційно-вакуумним осадженням. Парова фаза створюється різними джерелами тепла. Найбільш ефективно електронно-променеве випаровування твердих мішеней. Втрата стехіометрії в оксидах компенсується наступним відпалом виробів із захисним покриттям [9].

Оксидні газотермічні покриття з добавками металевої складової розглянуті в роботах Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, Т.В. Цымбалиста, Н.И. Капорик, М.А. [10] Ефективні в використанні покриття утворені при нанесенні оксидних жаростійких покриттів газотермічним напиленням за допомогою порошкових проволочок з металевою оболонкою або гнучких шнурів з органічною оболонкою.

У нинішній час виробництво жаростійких оксидних покриттів зосереджено в технологічних процесах, які реалізують оплавлення порошкових композицій надзвичайно складного складу. За кордоном широке розповсюдження здобули покриття із емалей. Розроблені десятки жаростійких емалей для високотемпературного захисту поверхонь виробів із сталей, хромонікелевих, титанових та інших сплавів. Більшість жаростійких емалей має силікатну основу  $\text{SiO}_2$  і багатокомпонентність за складом ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaF}_2$  та ін.), завдяки чому досягається висока температура розм'якшення покриття при високотемпературному нагріві. Склоподібні жаростійкі емалі забезпечують температуру експлуатації в газових середовищах при 600 °С і вище. Склокристалічні ситалові сполуки відрізняються більш високою температурою розм'якшення і, відповідно, більш жаростійкі (на 200-400 °С) у порівнянні зі склоподібними емаллями. Крім того, ситальні емалі мають кращу теплостійкість при змінних температурних умовах експлуатації. Ситалові покриття представляють собою кристалізовані силікатні емалі з великим вмістом (30% і більше) тонкодисперсної рівномірно розподіленої кристалічної фази. При нанесенні емалевих жаростійких покриттів відсутні ці недоліки, які наявні при газотермічному напиленні. Зокрема, реалізується висока адгезійна і когезійна міцність покриття, мінімальне число дефектів і менший рівень напруги. До недоліків емалевих покриттів відносяться високі температурні умови при їх виробництві і значно більш

низька температура експлуатації. Нанесенню жаростійких покриттів з оксидних оплавлених композицій присвячено безліч публікацій [11].

В роботах [10-12] розглянуто отримання жаростійких захисних покриттів на карбоновмісних матеріалах, які використовуються в якості конструкційних матеріалів. Покриття наносили методом вакуумного активованого насичення з використанням рідинної фази і процесу самопоширюючогося високотемпературного синтезу (СВС). Склад покриття визначається за допомогою термодинамічного аналізу та рентгенографії.

Боросиліцидні покриття зменшують пористість карбоновмісних матеріалів, а також збільшують їх жаро- і корозійну стійкість. Для створення працездатних жаростійких покриттів на карбоновмісних матеріалах застосовують метод вакуумного дифузійного насичення і СВС-процесу. Покриття формується на поверхні карбоновмісного матеріалу (графіт АРВ, МПГ) за допомогою конденсації з газової фази.

**Мета роботи** – вибір компонентного складу та дослідження закономірностей тертя та зношування, стійкості до окислення жарозносостійких покриттів системи Ni-Al-Ti-C-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O.

**Методика експериментальних досліджень.** Досліди проводили з використанням комплексної методики, що складається з методів визначення зносостійкості, фазового і структурного стану покриттів, мікромеханічних властивостей покриттів, міцнісних характеристик, а також статистичної обробки отриманих даних.

Для дослідження загальної структури зразків жарозносостійких покриттів, виготовлялися металографічні шліфи по загальноприйнятій методиці. Травлення зразків (шліфів) проводились розчином 4%-азотної кислоти в спирті. Металографічні дослідження зразків виконувались на оптичному металографічному мікроскопі МІМ-8.

Даний аналіз дозволяє виявити види зношування на поверхні зразка, ступінь їх припрацювання а також якість поверхні тертя, та придатність зразків для подальших досліджень.

Важливим критерієм оцінки окремих структурних складових і тонких приповерхневих шарів є показник мікротвердості.

Вимірювання мікротвердості проводилось на мікротведометрі ПМТ-3 (навантаження 0,5Н) вдавлюванням алмазного індентора. Мікротвердість характеризує опір пластичному вдавлюванню в поверхню твердого індентора, що є важливою характеристикою зміни властивості поверхневих шарів при терті.

Навантаження на індентор вибиралося відповідно до механічних властивостей досліджуваних покриттів і було однаковим як при вимірюванні вихідної мікротвердості, так і мікротвердості зразків після випробування. Глибина відбитка не перевищувала 2 мкм, що давало можливість оцінити мікротвердість найтонших поверхневих шарів.

При дослідженні жарозносостійких покриттів із композиційних порошкових матеріалів була реалізована програма, яка включає в себе дослідження їх триботехнічних властивостей з використанням фізико-хімічних і структурних методів дослідження.

При дослідженні жарозносостійких покриттів із композиційних порошкових матеріалів була реалізована програма, яка включає в себе дослідження їх фізико-хімічних і триботехнічних властивостей з використанням структурних методів дослідження. Дослідження проводились на модернізованій машині тертя УМТ-1, по стандартизованій схемі з використанням термічної приставки. Дана приставка дає можливість реалізовувати температурний режим роботи трибосполучення до 700 °С, що моделює більшість термічно навантажених пар тертя що використовуються в області загальної енергетики.

Рентгенофазовий аналіз досліджуваних покриттів здійснювався за допомогою дифрактометра ДРОН-УМ1. Зйомка проводилася в широкому кутовому діапазоні в Со-випромінюванні. На початку прописувались дифрактограми зі швидкістю 1/2° на хв. з обертанням зразків, потім виявлені піки детально прописувались зі швидкістю 1/8° на хв. і 1/16° на хв. Напряга 25 кВ, струм – 15 мА.

Визначення хімічного складу поверхні зразків, а також різних фаз, включень та недосконалостей покриття проводились за допомогою методу мікрорентгеноспектрального аналізу на мікроаналізаторі „КАМЕКА” моделі MS-46.

Застосування зазначених методів оптичної металографії, рентгенівського аналізу і електронної мікроскопії дозволили здійснити кількісний та якісний фазовий аналіз покриттів і продуктів зносу, вивчити тонку кристалічну структуру напилюваного шару, розкрити механізми і закономірності процесів тертя і зношування досліджуваних детонаційних покриттів як при нормальному атмосферному тиску, так і в умовах вакууму. І таким чином забезпечити отримання комплексу необхідної інформації для вирішення поставлених в роботі завдань.

**Обговорення основних результатів.** В якості основи гетерогенного жарозносостійкого покриття було обрано нікель. При температурі плавлення  $\approx 1455$  °C він утворює ряд твердих розчинів, для яких характерна поява практично всіх видів твердорозчинного зміцнення. В якості матеріалу нікель знаходить широке застосування в сплавах з особливими властивостями, особливо в жаростійких, на яких не одне десятиліття тримається високий рівень авіаційної техніки. Підвищення жаростійкості захисного покриття забезпечується введенням до складу алюмінію і титану, утворюючих з нікелем і між собою тугоплавкі і стабільні зміцнюючі фази, що забезпечує покриттю необхідні робочі властивості.

Додавання карбону при взаємодії з титаном утворює стійкий і високотемпературний карбід. Таким чином, структура гетерогенного жаростійкого покриття складається із основи ( $\gamma$ -фази), що є складнолегованим твердим розчином на основі нікелю, і  $\gamma'$ -фази – твердого розчину на основі інтерметалідного сполучення типу  $Ni_3Al$ . Основною зміцнюючою фазою в даному сплаві є  $\gamma'$ -фаза. Наявність у  $\gamma'$ -фази і  $\gamma$ -матриці (основи) сполучених кристалографічних решіток і близькість їх періодів, обумовлюють значне високотемпературне зміцнення. Крім того, має місце утворення термодинамічних фаз типу  $Ni_3(Al,Ti)$ ,  $NiAl$ , а також  $Ti_3Al$ ,  $TiAl$ ,  $TiAl_3$ . Також структура гетерогенного жарозносостійкого покриття містить як зміцнюючу фазу карбід титану, що має високу температуру плавлення ( $\approx 3257$  °C) і початкову твердість ( $\approx 32$  ГПа).

Крім того, додано значний вміст склофази, у вигляді алюмосилікату скла ( $SiO_2-Al_2O_3-B_2O_3$ ), наявність якої забезпечує значне підвищення суцільності, безпористості матеріалу, сприяє покращенню міцності, твердості та корозійній стійкості, що в комплексі значно впливає на підвищення показників жаростійкості. Необхідно зауважити, що склоутворюючі фази забезпечують в процесі експлуатації утворення нових тугоплавких і хімічно стійких сполучень, наприклад, утворення муліту із  $Al_2O_3$  і  $SiO_2$  ( $Al_2SiO_5$ ) і високотемпературної складової – титаліту ( $Al_2TiO_5$ ). На рис.1. представлені попередні дослідження порівнянь кінетики окислення підложки з нержавіючої сталі, при температурі 700 °C, без покриттів (крива 2). Та при тих же умовах із запропонованим захисним жарозносостійким покриттям системи  $Ni-Al-Ti-C-SiO_2-Al_2O_3-B_2O_3$ .

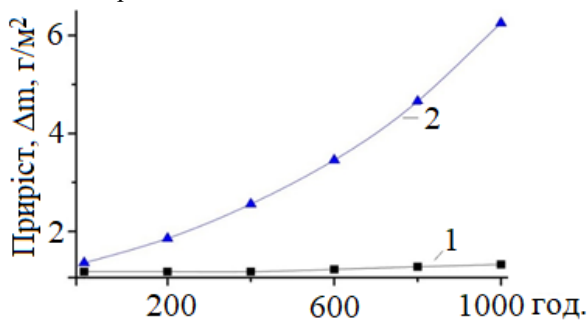


Рис. 1. Кінетика окислення нержавіючої сталі при температурі 700 °C без покриття (2), з покриттям  $Ni-Al-Ti-C-SiO_2-Al_2O_3-B_2O_3$  (1).

Залежність інтенсивності зношування від температури матеріалу із захисними жарозносостійкими покриттями у порівнянні з широковідомими матеріалами на основі карбиду вольфраму та карбідів представлені на рис. 2.

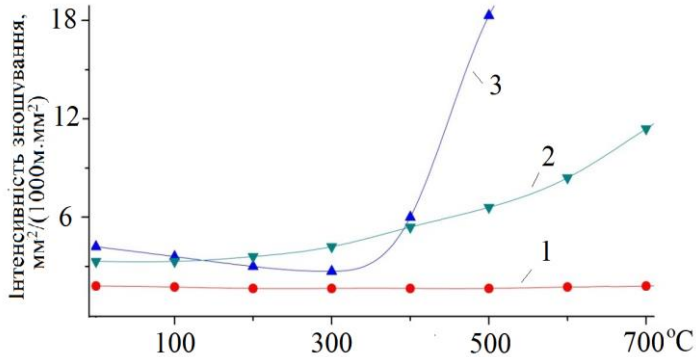


Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування від температури: 1 – Ni-Al-Ti-C-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2 – WC15; 3 – Ni-Cr-Al-B ( $V = 1,0$  м/с;  $P = 2,5$  МПа).

Рисунок 3 відповідає функціональній залежності інтенсивності зношування від швидкості ковзання для випробуваних покриттів з жарозносостійкого матеріалу (крива 1), та міцних покриттів з дефіцитних матеріалів (крива 2,3). Від отриманих результатів випробування зазначених покриттів можливо зробити наступні висновки:

- стійкість до окислення вище стійкості нержавіючої сталі більше ніж на порядок;
- інтенсивність зношування не змінюється в усьому досліджуваному діапазоні температур і є суттєво нижчою у порівнянні з традиційно застосовуваними зносостійкими матеріалами;
- інтенсивність зношування практично не залежить від швидкості ковзання при підвищених навантаженнях ( $P = 6$  МПа) і вдвічі менша порівняно із WC15.

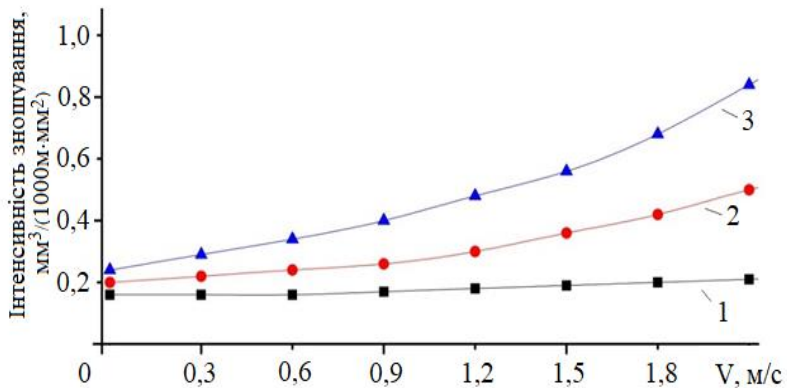


Рис. 3. Залежність інтенсивності зношування від швидкості ковзання: 1 – Ni-Al-Ti-C-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2 – WC15; 3 – Ni-Cr-Al-B ( $T = 450$  °С,  $P = 6$  МПа).

Таким чином, жарозносостійкі покриття з підвищеними параметрами жаростійкості найбільш ефективні при такому компонентному складі: нікелю 40% (мас.), алюмінію 9%(мас.), титану 26%(мас.), карбон 3%(мас.), склофаза 22%(мас.). Отримання жарозносостійкої структури покриття відбувається в планетарному млині шляхом механохімічного синтезу, основна фракція складає 60-90 нм.

Створення гетерогенних покриттів з підвищеними показниками жарозносостійкості, вирішує актуальну проблему в галузі загальної енергетики, зокрема ремонт, відновлення та підвищення надійності температуро-навантаженого обладнання.

**Висновки.**

1. Надано сучасний літературний огляд актуальності дослідження руйнівних явищ поверхонь деталей при їх термодинамічних навантаженнях.

2. Підкреслено, що існуючі жарозносостійкі покриття містять, головним чином, дорогі та дефіцитні складові, які істотно впливають на загальну вартість обладнання.

3. Проаналізовано сучасні методи розробки жарозносостійких покриттів, підкреслено їхні переваги та недоліки.

4. Розроблено склад жарозносостійких покриттів, обґрунтовано властивості елементів, та визначено їх вклад у структуру та вплив на експлуатаційні характеристики, в умовах термодинамічного навантаження.

5. Отримані результати досліджень показують високу стійкість розроблених покриттів до окислення та мінімальні показники інтенсивності зношування при зміні швидкості ковзання в умовах підвищеного навантаження у порівнянні із з покриттями карбиду вольфраму.

**Список літератури**

1. Yu-Lei Zhang, He-Jun Li, Xi-Yuan Yao, et al. Oxidation protection of C/SiC coated carbon/carbon composites with Si-Mo coating at high temperature // *Corrosion Science*. 2011, v. 53, p. 2075-2079.

2. Jian-Feng, Bo Wang, He-Jun Li, et al. A MoSi<sub>2</sub>/SiC oxidation protective coating for carbon/carbon composites // *Corrosion Science*. 2011, v. 53, p. 834-839.

3. Babak, V.P., Shchepetov, V.V., Nedaiborshch, S.D. (2016). Wear resistance of nanocomposite coatings with dry lubricant under vacuum. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* this link is disabled, 2016, (1), nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu\_2016\_1\_9

4. Babak V.P., Shchepetov V.V., Harchenko S.D. Antifriction Nanocomposite Coatings that Contain Magnesium Carbide. *J. Journal of Friction and Wear*, 40(6), Pp.593–598 (2019). [doi.org/10.3103/S1068366619060035](https://doi.org/10.3103/S1068366619060035).

5. Л.А. Ткаченко, А.Ю. Шаулов, А.А. Берлин. Защитные жаропрочные покрытия углеродных материалов // *Неорганические материалы*. 2012, т. 48, №3, с. 261-271.

6. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 60–70.

7. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С.17–20.

8. Баньковская И.Б., Васильева И.А., Коловертнов Д.В. Процессы окисления композиции кремний-бор-борид циркония в интервале температур 1000–1300°C // *Физика и химия стекла*. 2012. Т. 38. №3. С. 409–416.

9. Agüero A., Muelas R., Pastor A., Osgerby S. Long exposure steam oxidation testing and mechanical properties of slurry aluminide coatings for steam turbine components // *Surface & Coatings Technology*. 2005. No. 200. P. 1219–1224.

10. Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, Т.В. Цымбалиста, Н.И. Капорик, М.А. Васильковская Жаростойкие газотермические покрытия на основе интерметаллида FeAlCr с добавкой CeO<sub>2</sub> // *Журнал «Автоматическая сварка»*, № 9, 2019 г., С. 31-39

11. Agüero A., Muelas R., Gutierrez M., Van Vulpen R., Osgerby S., Banks J.P. Cyclic oxidation and mechanical behaviour of slurry aluminide coatings for steam turbine components // *Surface & Coatings Technology*. 2007. No. 201. P. 6253–6260.

12. Пугачева Н.Б. Современные тенденции развития жаростойких покрытий на основе алюминидов железа // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015. №3. С. 51–82.



S. D. KHARCHENKO

## FORMATION OF WEAR AND HARDRESISTANT COATINGS Ni-Al-Ti-C-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O SYSTEMS

The laws of formation of wear and hardresistant coatings of the Ni-Al-Ti-C-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O system are shown in the work and the results of their research at friction loading are given. The proposed coatings are characterized by having an order of magnitude higher resistance to oxidation compared to traditional heatresistant coatings, with high wear resistance. In the whole range of tests, the indicators of wear intensity remain virtually unchanged, and much lower than traditionally used wear-resistant materials. At change of speed of sliding in the conditions of the increased loadings and temperatures intensity of wear remains practically invariable and is twice less in comparison with coverings of tungsten carbide.

**Key words:** heat-resistant coatings, oxidation resistance, wear intensity, heat resistance.

### Referenses

1. Yu-Lei Zhang, He-Jun Li, Xi-Yuan Yao, et al. Oxidation protection of C/SiC coated carbon/carbon composites with Si-Mo coating at high temperature // Corrosion Science. 2011, v. 53, p. 2075-2079.
2. Jian-Feng, Bo Wang, He-Jun Li, et al. A MoSi<sub>2</sub>/SiC oxidation protective coating for carbon/carbon composites // Corrosion Science. 2011, v. 53, p. 834-839.
3. Babak, V.P., Shchepetov, V.V., Nedaiborshch, S.D. (2016). Wear resistance of nanocomposite coatings with dry lubricant under vacuum. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu [this link is disabled](https://doi.org/10.3103/S1068366619060035), 2016, (1), nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu\_2016\_1\_9
4. Babak V.P., Shchepetov V.V., Harchenko S.D. Antifriction Nanocomposite Coatings that Contain Magnesium Carbide. J. Journal of Friction and Wear, 40(6), Pp.593–598 (2019). doi.org/10.3103/S1068366619060035.
5. L.A. Tkachenko, A.Yu. Shaulov, A.A. Berlin. Zashchytne zharoprochnye pokrytyia uhlernodnykh materyalov // Neorhanycheskye materyaly. 2012, t. 48, no. 3, s. 261-271.
6. Kablov E.N., Muboiadzhan S.A. Zharostoikye y teplozashchytne pokrytyia dlia lopatok turbyny vysokoho davleniya perspektyvnykh HTD // Avyatsyonnye materyaly y tekhnolohyy. 2012. №S. S. 60–70.
7. Muboiadzhan S.A., Budynovskyi S.A., Haiamov A.M., Matveev P.V. High-temperature zharostoikye pokrytyia y zharostoikye sloy dlia teplozashchytnykh pokrytyi // Avyatsyonnye materyaly y tekhnolohyy. 2013. No. 1. S.17–20.
8. Bankovskaia Y.B., Vasyleva Y.A., Kolovertnov D.V. Protsess okysleniya kompozytsyy kremnyi-bor-boryd tsyrkonyia v yntervale temperatur 1000–1300°S // Fyzyka y khymyia stekla. 2012. T. 38. No. 3. S. 409–416.
9. Agüero A., Muelas R., Pastor A., Osgerby S. Long exposure steam oxidation testing and mechanical properties of slurry aluminide coatings for steam turbine components // Surface & Coatings Technology. 2005. No. 200. P. 1219–1224.
10. Yu.S. Borisov, A.L. Borisova, T.V. Tsymbalista, N.I. Kaporik, M.A. Vasilkovskaya Heat-resistant gas-thermal coatings based on FeAlCr intermetallic compound with the addition of CeO<sub>2</sub> // Journal "Automatic welding", No. 9, 2019, pp. 31-39
11. Agüero A., Muelas R., Gutierrez M., Van Vulpen R., Osgerby S., Banks J.P. Cyclic oxidation and mechanical behaviour of slurry aluminide coatings for steam turbine components // Surface & Coatings Technology. 2007. No. 201. P. 6253–6260.
12. Pugacheva N.B. Modern trends in the development of heat-resistant coatings based on iron aluminides // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2015. №3. pp. 51–82.

**Харченко Сергій Дмитрович** – к.т.н., с.н.с. відділу моніторингу і діагностики об'єктів енергетики Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ, вул. Антоновича 172, тел: +38 044 294 67 01, e-mail: nanoavia@ukr.net.