УДК 621.793 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.120-127

Ю.В. Дзядикевич, проф., д-р техн. наук
Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна
О.Б. Сван, доц., канд. мед. наук
Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського, Тернопіль, Україна
О.П. Захарчук, доц., канд. техн. наук, **П.В. Попович,** проф., д-р техн. наук, **Р.І. Розум,** доц., канд. техн. наук, **М.В. Буряк,** доц., канд. техн. наук
Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна
e-mail: yu.dziadykevych@wunu.edu.ua, svan@tdmu.edu.ua, olenaskyba8500@gmail.com, ppopovich@ukr.net, rozoom_ruslan@ukr.net, burjak74@ukr.net

Захист елементів двигунів транспортних засобів від окислення: технологічний аспект

Стаття присвячена проблемі захисту металевих конструкцій елементів двигунів транспортних засобів, а саме лопаток турбін, із тугоплавких металів і сплавів на їх основі від високотемпературного окислення. З метою забезпечення збільшення ресурсу роботи останніх були розроблені багатокомпонентні композиційні покриття на основі тугоплавких сполук, що володіють низькою швидкістю дифузної взаємодії. Розроблено методику і проведено низку досліджень щодо підвищення жаростійкості робочих лопаток турбін. Під час досліджень на робочих поверхнях було сформовано дифузійне боросиліцидне покриття на яке за допомогою шлікерного методу було нанесено шар із дисиліцида молібдена товщиною 120 мкм. Проведені дослідження показали, що при збільшенні товщини (понад 120 мкм) шару дисиліцидної суспензії спостерігалося її відрив від боросилікатної робочої поверхні лопаті турбіни. У зв'язку, з чим встановлено, що товщина шару $MoSi_2$ не повинна перевищувати 120 мікрон. За результатами випробування боросиліційованих лопаток із нанесенням на них шару $MoSi_2$ визначено, що із комбінованим покриттям лопатки турбін, при температурі 1600 ^{0}C, працюють протягом 450 годин, що в півтора рази перевищує ресурс роботи зразків тільки з боросиліцидним покриттям. Визначено, що шлікерний шар із $MoSi_2$ підвищує ресурс роботи боросиліцидного покриття. Проведено металографічний аналіз зразків, який показав, що багатошарове шлікерне покриття є композицією на основі дисиліцида молібдена, армованою тугоплавкими оксидами. Проведений ренгенофазовий аналіз захисної поверхневого шару щлікерного покриття, котрий показав, що після високотемпературного опікання крім силіцидів молібдену містить низку таких оксидів: $ZrSiO_4$, $HfSiO_4$, $YAlO_3$, $Y_4Al_2O_3$. Встановлено, що органічні сполуки одно- і двокомпонентних добавок, котрі вводять у насичуючу суміш, забезпечують формування на тугоплавких металах боросиліцидного покриття з певним розміщенням боридних і силіцидних шарів і регульованої структури силіцидного шару. Отже у сукупності ці фактори сприяють підвищенню ресурсу роботи захисного дифузного покриття.

двигуни, газотурбінні двигуни, дифузне покриття, боросиліцидне покриття, жаростійкість, тугоплавкі сполуки.

Постановка проблеми. З моменту відмови суспільства від коней, як основного засобу пересування, та часу створення перших парових двигунів і двигунів внутрішнього згорання, прогрес пішов дуже далеко. Багато науковців і винахідників у різні часи винаходило і патентувало велику кількість різних видів двигунів для транспортних засобів, що мають дивні характеристики. За рахунок останніх, вони були дешевшими при виробництві, потужнішими (в порівнянні з аналогами), довговічнішими та надійнішими ніж привичні нам сучасні двигуни внутрішнього згорання. На превеликий жаль усі дані характеристики не можливо поєднати в одній конкретній конструкції двигуна, у зв'язку з чим, у сучасних транспортних засобах

© Ю.В. Дзядикевич, О.Б. Сван, О.П. Захарчук, П.В. Попович, Р.І. Розум, М.В. Буряк, 2023

використання двигунів внутрішнього згорання займає лідируючі позиції. Більше того деякі винайдені двигуни випереджали свій час, а деякі напрацювання були використані для створення сучасних двигунів і технологій майбутнього. Також, необхідно відмітити, що в деяких видах двигунів виникає велика кількість експлуатаційних проблем. Одними з таких двигунів є газотурбінні двигуни, що володіють найбільшою питомою потужністю серед двигунів внутрішнього згорання. Які, маючи низку переваг, майже не використовуються в наземному транспорті, однією з причин чого є низька надійність їх елементів.

Робочі лопатки газотурбінних двигунів працюють в умовах знакозмінних навантажень і високих температур (більше 1000 ºС), що приводить до зменшення їх ресурсу роботи, однією з причин якого є високотемпературне їх окислення. Одним із напрямів забезпечення довговічності лопаток газотурбінних двигунів є застосування жаростійких матеріалів на основі тугоплавких металів і сплавів. Однак, низька їх жаростійкість вимагає розробки жаростійких покрить для захисту від високотемпературного окислення. На наш погляд, перспективним напрямом захисту лопаток турбін від окислення є формування на їх поверхні багатошарового композиційного покриття, у якому кожний шар композиції виконує певну функцію. Такий підхід повинен забезпечити захист лопаток від окислення і підвищити їх довговічність. З огляду на це, дослідження процесу підвищення жаростійкості робочих лопаток газотурбінних двигунів шляхом формування на їх поверхні композиційного багатошарового покриття є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі захисту металевих конструкцій із тугоплавких металів і сплавів на їх основі від впливу високотемпературного окислення присвячена низка робіт вітчизняних вчених, зокрема Тісов О.В. [1], Акримов В.А. [2], Черепова Т.С. [3], Нежведілов А.Ю. [4].

В роботі Тісова О.В. виконано термодинамічний аналіз взаємодії композиційних порошкових сплавів системи Co-TiC з повітрям [1, с. 165]. Визначено основні закономірності їх окиснення. Показано взаємний вплив вмісту карбіду хрому та титану на кількісний склад продуктів окиснення. На основі проведених аналітичних досліджень встановлено співвідношення кількісного та якісного складу продуктів взаємодії порошкових сплавів системи Co-TiC з повітрям та співвідношення їх компонентів. Формування захисних шарів можна передбачити та контролювати їх утворенням шляхом вибору відповідних легуючих елементів та фаз зміцнення за допомогою термодинамічного аналізу. Автором створена загальна модель процесу окиснення порошкових композиційних сплавів системи Co-TiC. Показано вплив вмісту хрому в матеріалі на склад і властивості оксидного шару. Встановлено, що зі збільшенням вмісту хрому в підкладці (понад 25% за об’ємом) зростає крихкість оксидного шару, що призводить до його сильного зношування.

Промислово-технічні характеристики нанесення плазмового термозахисного покриття на робочі поверхні лопаток газових турбін з використанням порошку CoCrAlYSi, отриманого електронно-променевою плавкою відповідних сплавів, наведено в працях Акримова В.А. [2, с. 30] Автором показано необхідність проведення контрольованої підготовки поверхні леза перед початком процесу нанесення відповідного покриття. Час між очищенням поверхні і нанесенням покриття регламентується. Також, в праці вказано величину оптимальних параметрів процесу нанесення покриттів, проведено дослідження їх структури та хімічного складу. Доведено, що покриття, отримане за допомогою плазмового напилення, відповідає встановленим вимогам технічних умов підприємства на теплоізоляційне покриття лопатей насадок. Плазмові покриття широко застосовуються в сучасному виробництві

як для надання особливих властивостей поверхні деталей, їх ремонту, так і для продовження терміну служби деталей і цілих виробів.

Дослідником Череповим Т.С. розроблено жаростійкий та зносостійкий ливарний сплав на основі кобальту для зміцнення контактних поверхонь робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів замість серійних сплавів ХТН-61 і ВЖЛ-2 [3, с. 24]. Високі показники жаростійкості досягнуто за рахунок проведення комплексного легування (модифікації) сплаву. На основі досліджень жаростійкості, зносостійкості, структури та температури плавлення сплавів авторами встановлено оптимальний хімічний та фазовий склад розробленого сплаву.

Жаростійкість, на порядок вище, ніж у сплаву серії ХТН-61, при збереженні інших властивостей. Структурно-фазова стабільність (до 0,8 – 0,9 т Пул).

Задача підвищення корозійної стійкості сталевих лопаток газотурбінних двигунів є комплексною задачею, яка поєднує в собі вирішення багатьох локальних питань. Одним із напрямків їх вирішення є застосування результатів у галузі інтенсифікованого формування поверхневого шару за допомогою високоякісних інноваційних технологій, що дозволяють вирішувати завдання починаючи з етапу конструювання і виробництва та впродовж періоду експлуатації, ремонту та модернізації газових турбін, тобто забезпечуючи підтримання їх роботоздатності впродовж усього їх життєвого циклу з забезпеченням високого рівня надійності. Проведені Нежведіловим А.Ю. дослідження приводять нас до думки, що метод азотування за допомогою вакуумного термічного циклу плазми пульсуючого тліючого розряду є найбільш перспективним методом підвищення корозійної стійкості сталевих лопаток компресора ГТД за умови його використання з технічною та науковою базою [4, с. 79]. Автором розроблене та запропоноване відповідне обладнання, яке забезпечує можливість впровадження даного методу у масове виробництво.

Однак, необхідно відмітити, що кількість досліджень присвячених проблемі підвищення жаростійкості конструкцій на основі тугоплавких металів і їх сплавів є недостатньою. Це зумовило необхідність проведення подальшого їх вивчення та дослідження.

Отже, проводячи аналіз робіт, присвячених проблемі захисту тугоплавких металів від високотемпературного окислення, можна зробити висновок, що перспективним захистом виробів повинні бути багатокомпонентні композиційні покриття на основі тугоплавких сполук, які мають низьку швидкість дифузійної взаємодії з основою і забезпечують високий ресурс роботи.

Постановка завдання. Розробка та обґрунтування складу багатокомпонентних композиційних покриттів на основі тугоплавких сполук з низькою швидкістю дифузної взаємодії з метою забезпечення збільшення ресурсу роботи елементів двигунів транспортних засобів, а саме: лопаток газотурбінних двигунів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сьогодні найбільш поширеним методом захисту високотемпературних покриттів тугоплавких матеріалів, що працюють у високотемпературних окислювальних середовищах, є нанесення силіцидного покриття, що дозволяє створити на поверхні деталі «самозаліковуючу» оксидну плівку.

Найбільш ефективним, із усіх силіцидів, на нашу думку, є використання дисиліциду молібдену. Із зростанням робочих температур експлуатації деталей із силіцидним покриттям фактор дифузійних процесів між дисиліцидом молібдену та металевою основою стає домінуючим та незворотнім. Знизити протікання небажаних процесів дифузії, які протікають у граничних шарах основи та покриття, можна, за рахунок формування бар’єру. Загальновідомим є факт, що бар’єрним шаром для дифундуючих атомів служить межа фаз, і у випадку використання багатошарових

покриттів спостерігається нижчий показник дифузії, у порівнянні із одношаровими покриттями.

Зменшення дифузійних процесів також відбувається у випадках, коли дифундуючий елемент формує багатокомпонентні фази, які забезпечують зниження їх хімічного потенціалу. Даний варіант реалізується при використанні боросиліцидного покриття.

Ще одним варіантом підвищення опору окисленню шлікерної частини покриття є нанесення на її поверхню композиції компоненти які мають високу температуру плавлення, низьку пружність дисоціації, не утворюють легкоплавких і летких сполук із елементами, які входять в склад окислювального середовища, а також в склад дифузійного покриття. Необхідно зазначити, що тим вимогам найбільш задовільняють оксиди цирконію, гафнію, ітрію, алюмінію та інші. На підставі цього для розробки високотемпературної композиції можна використовувати як наповнювач оксидну цирконієву – ітрієву кераміку ЦІС, яка містить 72 – 78% ZrO_2 +HfO_2 і 22-28% Y_2O_3. Основою може слугувати дисиліцид молібдену, який забезпечує надійне закріплення композиції на поверхні спеченого силіцидного шару. Необхідно зазначити, що шлікерне покриття повинно мати хорошу покривну здатність з цією метою в склад силіцидної композиції потрібно ввести речовину, яка має клеючі властивості, наприклад натрій алюмінат $NaAlO_2$.

Попередньо проведені досліди щодо вибору інгредієнтів композиції показали, що використання в суміші менше 60 % $MoSi_2$ погіршує закріплення високотемпературного шару. Якісний перший шлікерний шар товщиною до 250 мкм формується при такому вмісті компонентів (мас. %): $MoSi_2$–60, ЦИС-2 – 30 і $NaAlO_2$ – 10. З метою підвищення жаростійкості і ресурсу роботи багатошарової композиції кожний наступний шар товщиною приблизно 150 мкм вмістив на 20 % більше оксидної кераміки ніж попередній. Металографічний аналіз зразків показав, що багатошарове шлікерне покриття є композиція на основі дисиліцида молібдена, армована тугоплавкими оксидами (рис.1).

Травл. HF : HNO_3: H_2SO_4= 1:1:1.
1 – металева основа ; 2 – MoB; 3 – $MoSi_2$; 4 – силіцид – оксидна суміш; 5– суміш оксидів

Рисунок 1 – Мікроструктура багатошарованого покриття на робочій лопатці, х 400
Джерело: розроблено авторами

Ренгенофазовий аналіз захисного поверхневого шару шлікерного покриття показав, що після високотемпературного обпікання крім силіцидів молібдену містить низку таких оксидів: $ZrSiO_4$, $HfSiO_4$, $YAlO_3$, $Y_4Al_2O_3$.

З метою забезпечення збільшення ресурсу роботи робочих лопаток турбін газотурбінних двигунів були розроблені багатокомпонентні композиційні покриття на основі тугоплавких сполук, що володіють низькою швидкістю дифузної взаємодії. Розроблено методику і проведено низку досліджень щодо підвищення жаростійкості робочих лопаток турбін газотурбінних двигунів. Під час досліджень на робочих поверхнях було сформовано дифузійне боросиліцидне покриття на яке за допомогою шлікерного методу було нанесено шар із дисиліцида молібдена товщиною 120 мкм. Для приготування суспензії використовували порошок $MoSi_2$ зернистістю до 40 мкм і дистильовану воду у співвідношенні 3:1. Лопатки турбін після процесу нанесення силіцидного шару спочатку піддавали просушуванню при температурі 100 ºС протягом пів години, а потім проводили їх нагрів до температури 1000 ºС при якій давали витримку 15 хв. Такий технологічний режим дозволяє забезпечити закріплення шлікерного шару по всій поверхні дифузійного покриття робочої частини лопатки турбіни. Проведені досліди показали, що у випадку збільшення товщини (більше 120 мкм) шару дисиліцидної суспензії спостерігається її відшарування від боросиліційованої поверхні робочої лопатки. У зв'язку з чим, нами зроблено висновок, що товщина шару дисиліцидної суспензії $MoSi_2$ не повинна перевищувати 120 мкм.

В результаті проведених нами випробувань боросиліційованих лопаток турбін газотурбінних двигунів із нанесеним шаром $MoSi_2$ нами відмічено, що у випадку використання комбінованого покриття при температурі 1600 ^{0}C, лопатки турбін відпрацювали до відмови протягом 450 годин. Даний показник ресурсу роботи є в півтора рази вищим, в порвнянні із зразками, що мають тільки боросиліцидне покриття. Таким чином, шлікерний шар із дисиліцидної суспензії $MoSi_2$ дозволяє підвищити ресурс роботи боросиліцидного покриття, а отже і лопаток турбіни двигуна в цілому.

Висновки. Таким чином, можна зробити висновок, що органічні сполуки одно- і двокомпонентних добавок, котрі вводять у насичуючу суміш, забезпечують формування на тугоплавких металах боросиліцидного покриття з певним розміщенням боридних і силіцидних шарів і регульованої структури силіцидного шару. У випадку використання комбінованого покриття при температурі 1600 ^{0}C, лопатки турбін газотурбінних двигунів відпрацювали до відмови протягом 450 годин. Даний показник ресурсу роботи є в півтора рази вищим, в порвнянні із зразками, що мають тільки боросиліцидне покриття. Таким чином, шлікерний шар із дисиліцидної суспензії $MoSi_2$ дозволяє підвищити ресурс роботи боросиліцидного покриття, а отже і лопаток турбіни газотурбінних двигунів в цілому. Однак, необхідно відмітити, що товщина шару дисиліцидної суспензії $MoSi_2$ не повинна перевищувати 120 мкм, оскільки у випадку збільшення товщини (більше 120 мкм) шару дисиліцидної суспензії спостерігається її відшарування від боросиліційованої поверхні робочої лопатки.

Список літератури

1. Прогнозування високотемпературного окиснення жароміцних сплавів системи Co-TiC / О. В. Тісов та ін. . *Проблеми тертя та зношування.* 2012. Вип. 57. С. 163-169.
2. Промислова технологія нанесення двошарових плазмових теплозахисних покриттів на лопатки газових турбін / В.А. Акримов та ін. *Сучасна електрометалургія*. 2020. № 4. С.28-31.
3. Зносостійкий сплав для захисту контактних поверхонь робочих лопаток авіаційних двигунів від окислення при високих температурах / Т.С. Черепова, Г.П. Дмитрієва, А.В. Носенко, О.М. Семирга . *Наука та інновації*. 2014. Т. 10, № 4. С. 22—31

4. Нежведілов А.Ю. Аналіз методів підвищення корозійної стійкості сталевих лопаток компресора гтд Національний аерокосмічний університет ім. М.Е. Жуковського "ХАІ", Україна. *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* 2011. № 6 (83) . С.77-80.
5. Дзядикевич, Ю. Шляхи підвищення жаростійкості виробів із тугоплавких металів від високотемпературного окислення . *Українська наука : минуле, сучасне, майбутнє : щорічник.* 2008. Вип. 13. С. 20-28.
6. Спосіб одержання жаростійкого покриття на виробах із ніобію, танталу та їх сплавів : пат. 32804 A U Україна, МПК (2006) C23C 10/00. / Ю. В. Дзядикевич, Л. І. Кицкай (Україна); заявник та патентовласник Ю. В. Дзядикевич, Л. І. Кицкай. – № 98042154; заявл. 29.04.1998; опубл. 15.02.2001, бюл. № 1.
7. Спосіб формування жаростійкого покриття на виробах із тугоплавких металів і сплавів : пат. 30770 A U Україна, МПК (2006) C23C 12/00. / Ю. В. Дзядикевич, Л. І. Кицкай (Україна); заявник та патентовласник Ю. В. Дзядикевич, Л. І. Кицкай. – № 98052755; заявл. 27.05.1998; опубл. 29.12.1999, бюл. № 8.
8. Спосіб обробки виробів на основі карбіду кремнію та дисиліциду молібдену : пат. 30240 A U Україна, МПК C04B 35/56 (2006.01) C04B 41/87 (2006.01) H05B 3/14 (2006.01). / Ю. В. Дзядикевич, І. Й. Бочар, Р. М. Горбатюк (Україна); заявник та патентовласник Ю. В. Дзядикевич, І. Й. Бочар, Р. М. Горбатюк. – № 98020580; заявл. 03.02.1998; опубл. 15.11.2000, бюл. № 6.
9. Склад суміші для борування виробів із карбіду кремнію та дисиліциду молібдену : пат. 30237 A U Україна, МПК C23C 10/30 (2006.01) C23C 10/48 (2006.01) C23C 10/56 (2006.01). / Ю. В. Дзядикевич, І. Й. Бочар, Р. М. Горбатюк (Україна); заявник та патентовласник Ю. В. Дзядикевич, І. Й. Бочар, Р. М. Горбатюк. – № 98020577; заявл. 03.02.1998; опубл. 15.11.2000, бюл. № 6.
10. Спосіб підвищення пластичності молібдену і вольфраму та їх сплавів : пат. 3663 U Україна, МПК C22F 1/18 (2006.01). / Ю. В. Дзядикевич (Україна); заявник та патентовласник Тернопільська академія народного господарства. – № 2004020747; заявл. 03.02.2004; опубл. 15.12.2004, бюл. № 12.
11. Корбак С.І., Розум Р.І. Двигуни: минуле і сьогодення. *Тенденції і виклики сучасної аграрної науки: теорія і практика*: зб. матеріалів ІІІ Міжнародної наук. конф. (м. Київ, 20-22 жовтня 2021 р.). Київ: НУБіП, 2021. С. 312.
12. Rozum R.I., Buriak M. V., Zakharchuk O. P. Innovative engines in the history of automobile building. *Modern engineering and innovative technologies.* Sergeieva&Co Karlsruhe (Germany) 2021. Issue 18. Part 2. P. 64 – 67.
13. Rozum R.I., Shevchuk O. S., Prohnii P. B. Optimization of working processes of internal combustion engines with the purpose of improving their environmentality. *Modern engineering and innovative technologies.* Sergeieva&Co Karlsruhe (Germany) . 2022. Issue 19. Part 1. P. 147-150.
14. Фалович Н.М., Верес М.В., Розум Р.І. та інші. Огляд обладнання для діагностики та ремонту двигунів внутрішнього згорання. *Наукові записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2022. 33 (72). № 5. С.325-329.
15. Методологія діагностування автомобільних дизельних двигунів. / Р. Розум та ін. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2022. 1(18). С. 138-142.

References

1. Tisov, O.V., Dukhota, O.I., Cherepova, T.S., Lytvynenko, V.F. & Miedviedieva, N.A. (2012). Prohnozuvannia vysokotemperaturnoho okysnennia zharomitsnykh splaviv systemy So-TiS [Prediction of high-temperature oxidation of heat-resistant alloys of the Co-TiS system]. *Problemy tertia ta znoshuvannia – Friction and wear problems.. Issue 57*, 163-169 [in Ukrainian].
2. Akrymov, V.A. Hrechaniuk, I.M., Smashniuk, Yu.O., Hrechaniuk, V.H. & Liubarenko, M.P. (2020). Promyslova tekhnolohiia nanesennia dvosharovykh plazmovykh teplozakhysnykh pokryttiv na lopatky hazovykh turbin [Industrial technology of applying two-layer plasma heat-protective coatings on gas turbine blades] . *Suchasna elektrometalurhiia – Modern electrometallurgy, 4*, 28-31. [in Ukrainian].
3. Cherepova, T.S. Dmytriieva, H.P., Nosenko, A.V. & Semyrha,O.M. (2014). Znosostiikyi splav dlia zakhystu kontaktnykh poverkhon robochykh lopatok aviatsiinykh dvyhuniv vid okyslennia pry vysokykh temperaturakh [Wear-resistant alloy to protect the contact surfaces of the working blades of aircraft engines from oxidation at high temperatures] . *Nauka ta innovatsii – Science and innovation, Vol. 10, 4*, 22–31 [in Ukrainian].
4. Nezhvedilov, A.Iu. (2011). Analiz metodiv pidvyshchennia koroziinoi stiikosti stalevykh lopatok kompresora htd Natsionalnyi aerokosmichnyi universytet im. M.E. Zhukovskoho "KhAI", Ukraina. [Analysis of methods of increasing the corrosion resistance of steel blades of the compressor gtd National

Aerospace University named after M.E. Zhukovsky "HAI", Ukraine]. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia – Aerospace engineering and technology*, *6 (83)*, 77-80. [in Ukrainian].

5. Dziadykevych, Yu. (2008). Shliakhy pidvyshchennia zharostiikosti vyrobiv iz tuhoplavkykh metaliv vid vysokotemperaturnoho okyslennia [Ways to increase the heat resistance of products made of refractory metals from high-temperature oxidation*]. Ukrainska nauka : mynule, suchasne, maibutnie : shchorichnyk – Ukrainian science: past, present, future: yearbook*, *Issue 13*. 20-28. [in Ukrainian].
6. Sposib oderzhannia zharostiikoho pokryttia na vyrobakh iz niobiiu, tantalu ta yikh splaviv [The method of obtaining a heat-resistant coating on products made of niobium, tantalum and their alloys]. Pat. 32804 A U Ukraina, MPK (2006) C23C 10/00. / Yu. V. Dziadykevych, L. I. Kytskai (Ukraina); zaiavnyk ta patentovlasnyk Yu. V. Dziadykevych, L. I. Kytskai. – № 98042154; zaiavl. 29.04.1998; opubl. 15.02.2001, biul. № 1. [in Ukrainian].
7. Sposib formuvannia zharostiikoho pokryttia na vyrobakh iz tuhoplavkykh metaliv i splaviv [The method of forming a heat-resistant coating on products made of refractory metals and alloys]. Pat. 30770 A U Ukraina, MPK (2006) C23C 12/00. / Yu. V. Dziadykevych, L. I. Kytskai (Ukraina); zaiavnyk ta patentovlasnyk Yu. V. Dziadykevych, L. I. Kytskai. – № 98052755; zaiavl. 27.05.1998; opubl. 29.12.1999, biul. № 8. [in Ukrainian].
8. Sposib obrobky vyrobiv na osnovi karbidu kremniiu ta dysylitsydu molibdenu [The method of processing products based on silicon carbide and molybdenum disilicide]. Pat. 30240 A U Ukraina, MPK C04B 35/56 (2006.01) C04B 41/87 (2006.01) H05B 3/14 (2006.01). / Yu. V. Dziadykevych, I. Y. Bochar, R. M. Horbatiuk (Ukraina); zaiavnyk ta patentovlasnyk Yu. V. Dziadykevych, I. Y. Bochar, R. M. Horbatiuk. – № 98020580; zaiavl. 03.02.1998; opubl. 15.11.2000, biul. № 6. [in Ukrainian].
9. Sklad sumishi dlia boruvannia vyrobiv iz karbidu kremniiu ta dysylitsydu molibdenu [The composition of the mixture for boronizing products made of silicon carbide and molybdenum disilicide]. Pat. 30237 A U Ukraina, MPK C23C 10/30 (2006.01) C23C 10/48 (2006.01) C23C 10/56 (2006.01). / Yu. V. Dziadykevych, I. Y. Bochar, R. M. Horbatiuk (Ukraina); zaiavnyk ta patentovlasnyk Yu. V. Dziadykevych, I. Y. Bochar, R. M. Horbatiuk. – № 98020577; zaiavl. 03.02.1998; opubl. 15.11.2000, biul. № 6. [in Ukrainian].
10. Sposib pidvyshchennia plastychnosti molibdenu i volframu ta yikh splaviv [The method of increasing the plasticity of molybdenum and tungsten and their alloys] . Pat. 3663 U Ukraina, MPK C22F 1/18 (2006.01). / Yu. V. Dziadykevych (Ukraina); zaiavnyk ta patentovlasnyk Ternopilska akademiia narodnoho hospodarstva. – № 2004020747; zaiavl. 03.02.2004; opubl. 15.12.2004, biul. № 12.
11. Korbak S.I., Rozum R.I. (2021). Dvyhuny: mynule i sohodennia [Trends and challenges of modern agricultural science: theory and practice]. Tendentsii i vyklyky suchasnoi ahrarnoi nauky: teoriia i praktyka: *III Mizhnarodna nauk. konf. (m. Kyiv, 20-22 zhovtnia 2021 r.) – III International Scientific Conference (p. 312.).* Kyiv: NUBiP [in Ukrainian].
12. Rozum, R.I., Buriak, M. V. & Zakharchuk, O. P. (2021). Innovative engines in the history of automobile building. *Modern engineering and innovative technologies*. Sergeieva&Co Karlsruhe (Germany) . Issue 18, Part 2, P. 64 – 67 [in English].
13. Rozum, R.I., Shevchuk, O. S. & Prohnii, P. B. (2022). Optimization of working processes of internal combustion engines with the purpose of improving their environmentality. *Modern engineering and innovative technologies*. Sergeieva&Co Karlsruhe (Germany), Issue 19, Part 1, P. 147-150 [in English].
14. Falovych, N.M., Veres, M.V., Rozum, R.I. et al. (2022). Ohliad obladnannia dlia diahnostyky ta remontu dvyhuniv vnutrishnoho zghorannia [Overview of equipment for diagnostics and repair of internal combustion engines]. *Naukovi zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I.Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky – Scientific notes of V.I. Vernadsky Tavri National University. Series: Technical sciences, 33 (72), № 5*, 325-329. [in Ukrainian].
15. Rozum, R., Buriak, M., Popovych, P., Prohnii, P. & Zakharchuk, O. (2022). Metodolohiia diahnostuvannia avtomobilnykh dyzelnykh dvyhuniv [Methodology for diagnosing automotive diesel engines]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti – Modern technologies in mechanical engineering and transport, 1(18),* 138-142. [in Ukrainian].

Yuriy Dzyadykevych, Prof., DSc.
Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine
Olga Swan, Assoc. Prof., PhD med. sci.
Ternopil National Medical University named after I.Ya. Gorbachevskii, Ternopil, Ukraine
Olena Zakharchuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Pavlo Popovich,** Prof., DSc., **Ruslan Rozum,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mukola Buryak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Protection of Vehicle Engine Elements Against Oxidation: Technological Aspect

Multi-component composite coatings based on refractory compounds with a low speed of diffuse interaction, are concerned in the article in order to increase the service life. A study was conducted to increase the heat resistance of working blades, in which a diffusion borosilicide coating was formed on their surface; on the surface of coating a layer of molybdenum disilicide with a thickness of 120 μm was applied using the slip method.

Experiments showed that when the thickness (over 120 microns) of the layer of disilicide suspension was increased, its detachment from the borosilicate surface of the working blade was observed. It was found that the thickness of the $MoSi_2$ layer should not exceed 120 microns. Based on the results of the test of borosilicinated blades with a layer of $MoSi_2$, the combined coating at a temperature of $1,600^0$C works for 450 hours, which is one and a half times longer than the service life of samples with only a borosilicide coating. The slip layer made of $MoSi_2$ is found to increase the service life of the borosilicide coating. A metallographic analysis of the samples was carried out, which proved that the multi-layered coating is a composition based on molybdenum disilicide, reinforced with refractory oxides. An X-ray phase analysis of the protective surface layer of the slip coating was carried out, which showed that after high-temperature treatment, in addition to molybdenum silicides, it contains a number of the following oxides: $Zr SiO_4$, $HfSiO_4$, $YAlO_3$, $Y_4Al_2O_3$.

According to the study, organic compounds of one- and two-component additives, introduced into the saturating mixture, ensure the formation of a borosilicide coating on refractory metals with a certain arrangement of boride and silicide layers and an adjustable structure of the silicide layer. Therefore, in aggregate, these factors contribute to increasing the service life of the protective diffuse coating.

engines, gas turbine engines, diffuse coating, borosilicide coating, heat resistance, refractory compounds

Одержано (Received) 27.03.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2023*
Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023

УДК 656.1 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.127-135

Л.А. Тарандушка, проф., д-р техн. наук, **М.П. Рудь,** доц., канд. техн. наук,
О.В. Батраченко, доц., д-р техн. наук
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна
e-mail: tarandushkal@ukr.net; hochspannung77@gmail.com; avbatrachenko1980@gmail.com

Аеродинамічний аналіз впливу повітряних потоків від вантажівки на рух мотоцикла

В статті досліджується проблема забезпечення безпеки руху мотоцикла в умовах турбулентного повітряного сліду створеного великогабаритним вантажним автомобілем. При керуванні мотоциклом особливу небезпеку становить рух в умовах турбулентних повітряних потоків з різкою зміною їх швидкості та напряму. Було побудовано аеродинамічну модель руху вантажного автомобіля і мотоцикла для різного їх взаємного розташування. Було проведено дослідження моделей турбулентності, щоб оцінити точність найпоширеніших моделей Нав'є-Стокса, усереднених за Рейнольдсом таких як k–ε і k–ω. Встановлено зони в яких виникають найбільші зміни тиску повітря при русі мотоцикла, визначено величину цих змін. Відповідно надано рекомендації щодо особливостей руху мотоцикла при обгоні великогабаритного вантажного автомобіля та безпечної траєкторії при якій такий маневр найбільш безпечний для водіїв з недостатнім досвідом управління мотоциклом.

аеродинамічний аналіз, моделі турбулентності, безпека руху мотоцикла

Постановка проблеми. Обчислювальна гідродинаміка (CFD) – це галузь науки, що вивчає рух рідин та газів за допомогою математичних методів та комп'ютерної технології. Вона знайшла застосування в багатьох галузях, таких як авіаційна та автомобільна промисловість, енергетика, морська промисловість, медицина та інші.

© Л.А. Тарандушка, М.П. Рудь, О.В. Батраченко, 2023