

УДК 621.793

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.151-159](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.151-159)

Ю.В. Дзяди́кевич, проф., д-р техн. наук, **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

В.В. Шевчук, доц., канд. техн. наук

Львівський національний університет природокористування, м.Дубляни, Україна

*e-mail: yu.dziadykevych@wunu.edu.ua, olenaskyba8500@gmail.com, ppopovich@ukr.net,
rozoom_ruslan@ukr.net, burjak74@ukr.net, pr_lnu@ukr.net*

Використання боридних і силіцидних покриттів у ДВЗ: технологічний аспект

В статті досліджено основні закономірності процесу формування на тугоплавких металах однофазних, багатофазних, багат шарових композиційних покриттів із високими показниками жаростійкості та довговічності. Проведено дослідження боридного покриття на тугоплавких металах, яке показало, що на металах утворюється однофазне покриття, яке має хороше зчеплення з основою. Виявлено утворення моноборидної фази на молібдені та вольфрамі та боридна на ніобію і танталі, за результатами рентгенофазового та мікрорентгеноспектрального методів аналізу. Проведено дослідження впливу температури на процес дифузійного силіціювання тугоплавких металів, яке показало, що в інтервалі 950–1100 °С формується однофазне покриття, яке складається із дисиліцидів металів $MeSi_2$. Виявлено, що подальше підвищення температури процесу насичення приводить до різкого росту товщини силіцидного шару. Встановлено, що ефективним дифузійним бар'єром є боридні фази тугоплавких металів, які забезпечують стабільність дифузійній частині багатокомпонентного покриття. Визначено, що боридні фази по відношенню до металеві основи більш стабільні, ніж силіцидні. Завдяки утворенню на границі боридних і силіцидних шарів силікоборидних фаз забезпечується висока стабільність боросиліцидного покриття. Визначено, що наявність проникаючих домішок в металевій матриці призводить до поганого захисту оксидної плівки дифузійного покриття і, як наслідок, до низької довговічності. Запропоновано механізм перенесення проникаючих домішок із глибини металу до межі порошкового середовища. Отримані боросилікатно-насичені металеві технологічні параметри дозволяють формувати дифузійне покриття з дрібнозернистою структурою на тугоплавких металах. Для забезпечення високих захисних характеристик необхідне подальше дослідження формування шаруватої частини покриття.

двигуни, процес силіціювання металів, процес борування металів, дифузійний шар

Постановка проблеми. Збільшення потужності двигунів внутрішнього згорання за рахунок використання новітніх видів палив зумовило застосування тугоплавких металів при виробництві елементів ДВЗ. Тугоплавкі метали (ніобій, тантал, молібден, вольфрам) і сплави на їх основі володіють унікальним комплексом фізико-механічних і хімічних властивостей. Це дозволяє їм займати у високотемпературній техніці чільне місце [1, с. 94]. Однак низька жаростійкість обмежує їх практичне застосування. На сьогоднішній день захист тугоплавких металів від високотемпературного окислення реалізується різними шляхами. Одним із них є формування на їх поверхні дифузійного силіцидного покриття ($MeSi_2$). Однак одношарові покриття є неефективні і не відповідають сучасним вимогами високотемпературної техніки, характерними ознаками якої є підвищення робочих температур, знакозмінні навантаження та вплив агресивного середовища. Проведений аналіз робіт, присвячених проблемі захисту тугоплавких металів від окислення, свідчить про те, що багато вчених вважають, що

© Ю.В. Дзяди́кевич, О.П. Захарчук, П.В. Попович, Р.І. Розум, М.В. Буряк, В.В. Шевчук, 2023

захисне покриття повинно відповідати комплексу вимог і водночас виконувати різні функції, кількість яких значно зростає у випадку експлуатації виробу в умовах термоциклювання. На наш погляд така думка є хибною, оскільки не сприяє підвищенню жаростійкості тугоплавких металів шляхом формування на їх поверхні захисного покриття. Перспективним напрямом захисту тугоплавких металів від високотемпературного окислення є формування на їх поверхні багат шарового покриття у якому кожний шар виконує певну функцію, наприклад, зовнішній шар забезпечує жаростійкість боросиліцидної композиції; внутрішній шар запобігає взаємодії дифузійної складової покриття з основою; дифузійний шар сприяє релаксації напруги у покритті при багаторазовій зміні температурного режиму, а також покращує адгезію між шарами покриття. Такий підхід повинен забезпечити ефективний захист тугоплавких металів від окислення і водночас підвищити їх довговічність.

З огляду на це, дослідження процесу підвищення жаростійкості тугоплавких металів шляхом формування на їх поверхні багат шарового покриття, яке складається з дифузійної і шлікерної зони є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі захисту конструкцій із тугоплавких металів від високотемпературного окислення присвячена низка робіт вітчизняних вчених, зокрема: Кицькай Л.І. [2, с. 6], Погребова І.С. [3, с. 92], Буряк М. В. [4, с. 14], Г.В. Каракуркчі [5, с. 58]. Однак пошук наукових робіт, проведений за останні роки показав, що кількість досліджень, присвячених проблемі підвищення жаростійкості тугоплавких металів, надзвичайно мала. Це зумовило необхідність їх подальшого вивчення.

У дисертації Кицькай Л.І. [2, 12] вивчено вплив фторидів металів першої-А групи на збільшення інтенсивності процесу насичення танталу і ніобію молібденом і вольфрамом. За результатами проведених досліджень запропоновано механізм утворення твердозамінних розчинів у тугоплавких металах. Вперше показано можливість отримання боридної, силіцидної та боросиліцидної фаз на основі твердих розчинів молібдену в ніобії та танталі, які є складовими елементами дифузійної частини багат шарових покриттів. Визначено технологічні параметри процесу нанесення багат шарових термостійких покриттів з ніобію та танталу та покращено показник ефективності.

У роботі І. С. Погребова [3, с. 93] досліджено захисні властивості хромсиліцидних дифузійних покриттів, нанесених на сталь 45 і отриманих газовим методом. Доведено, що покриття з силіцидів хрому, отримані цим методом, мають високу термостійкість до 1000°C. Встановлено, що дифузійні хромсиліцидні покриття, окислені при 700–800°C, більш стійкі до корозії в різноманітних агресивних середовищах і мають більш стабільний стан пасивації, ніж неокислені покриття. На основі проведених досліджень запропоновано новий спосіб нанесення дифузійного покриття на поверхню вуглецевої сталі з подальшим окисленням. Хромсиліцидні покриття, отримані запропонованим способом, дозволять рекомендувати їх для практичного використання в умовах, коли вироби з вуглецевої сталі одночасно піддаються впливу корозійних середовищ і високих температур.

Одним із найефективніших технологічних підходів до зміцнення та ремонту пошкоджених поверхонь і підвищення надійності механічних деталей двигунів внутрішнього згорання є модифікація поверхневих шарів металу шляхом нанесення функціональних покриттів. Покращення механічних властивостей, економічність процесу, можливість формування покриттів з металів і багатокomпонентних сплавів, які важко отримати металургійними або хімічними методами, широкі варіації властивостей гальванічних осадів залежно від загальних властивостей наплавлених компоненти, являють собою гальванічні покриття. Компоненти шарового переднього

плану широко використовуються у виробничій та ремонтній практиці. Легування кобальтових покриттів молібденом і вольфрамом прогнозовано покращує фізико-механічні властивості та корозійну стійкість електrolітичних сплавів

Враховуючи те, що самоідентифіковані метали не відновлюються на катоді, вони легко соосажаються в сплави з Fe і Co, а через особливості процесу легування утворені системи в більшості випадків є аморфними або нанокристалічними. Структурна однорідність сформованих тонкоплівкових матеріалів сприятиме покращенню корозійної стійкості та механічних властивостей, що дозволяє розглядати їх як перспективні конструкційні матеріали в технологіях поверхневого зміцнення та запобігання пошкодженням [5, с. 95].

Отже, аналізуючи роботи, присвячені захисту тугоплавких металів від високотемпературного окислення, можна зробити висновок, що перспективним захистом елементів ДВЗ повинні бути багатокомпонентні композиційні покриття на основі тугоплавких сполук, які мають низьку швидкість дифузійної взаємодії з основою і забезпечують високий ресурс роботи.

Постановка завдання. Дослідження основних закономірностей процесу формування на тугоплавких металах однофазних, багатофазних, багатошарових композиційних покриттів із високими показниками жаростійкості та довговічності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розширити галузь застосування тугоплавких металів і сплавів можна шляхом формування на їх поверхні боридних і силіцидних шарів, які мають високу твердість, стійкість проти спрацювання, підвищену жаро- і корозійну стійкість.

Насичення тугоплавких металів і сплавів бором і кремнієм є складним фізико-хімічним процесом, який складається із таких стадій:

- доставка дифундуючого елемента до металевої поверхні та хемосорбція його поверхню металу;
- дифузія бора (кремнія) через шар фази, що утворилася;
- проходження хімічних реакцій на границі розділу фаз.

Для формування захисних покриттів на тугоплавких металах найбільш широке застосування має дифузійне насичення в порошкових сумішах із використанням контейнерів із плавким затвором. Необхідно зазначити, що на якість дифузійного шару впливають різні чинники, зокрема: температура насичення, тривалість процесу, кількість дифузійного джерела, наявність домішок у суміші та вміст активатора.

Для борування металів і сплавів як насичуюче середовище використовували технічний карбід бора, концентрація, якого змінювалася від 20 до 80%, а решта був оксид алюмінію. Зернистість карбиду бора не перевищувала 120 мкм. Насичення проводили в інтервалі температур 950–1100 °С. Тривалість процесу борування була 2,4,6,8,12 годин. Дослідження показало, що на металах утворюється однофазне покриття, яке має хороше зчеплення з основою. За даними металографічного та рентгенофазового методів аналізу на молібдені та вольфрамі формується моноборидна фаза α -MeB, яка має голчасту структуру (рис.1). Водночас на ніобію і танталі, за результатами рентгенофазового та мікрорентгеноспектрального методів аналізу, утворюється боридна фаза MeB₂.

Вона має дрібні виступи, які направлені до основи. Збільшення концентрації карбиду бора в насичуючій суміші (більше 80 %) приводить до росту товщини шару покриття, але спостерігається погіршення його якості, появляються тріщини і порушується розмірність по товщині шару покриття. Аналогічна картина має місце при підвищенні температури процесу насичення (більше 1100 °С) та збільшення тривалості борування (більше 12 годин). На підставі проведених досліджень можна запропонувати механізм формування покриття. Починаючи з 600 °С, у насичуючому

середовищі відбувається взаємодія карбіду бору з киснем повітря, що знаходиться в контейнері, з утворенням борного ангідриду і вільного вуглецю, кількість якого з підвищенням температури та вмісту карбіду бору в суміші зростає швидше, ніж субоксиду бору B_2O_2 , який здійснює транспортні функції щодо бору. При температурі насичення в контейнері відбувається реакція взаємодії карбіду бору з борним ангідридом і взаємодія продуктів їх реакції з поверхнею тугоплавкого металу. Водночас із появою розплаву $B_2O_3 - B_2O_2$, вуглець, який знаходиться на поверхні металу, дифундує в основу з утворенням карбідних фаз. На поверхні розділу насичуюча суміш – тугоплавкий метал відбуваються такі реакції: $B_2O_3 + C \rightarrow B_2O_2 + CO$ і $B_2O_2 + C \rightarrow 2B + CO_2$, які в умовах експерименту термодинамічно можливі. В результаті взаємодії вуглецю з оксидами бору.

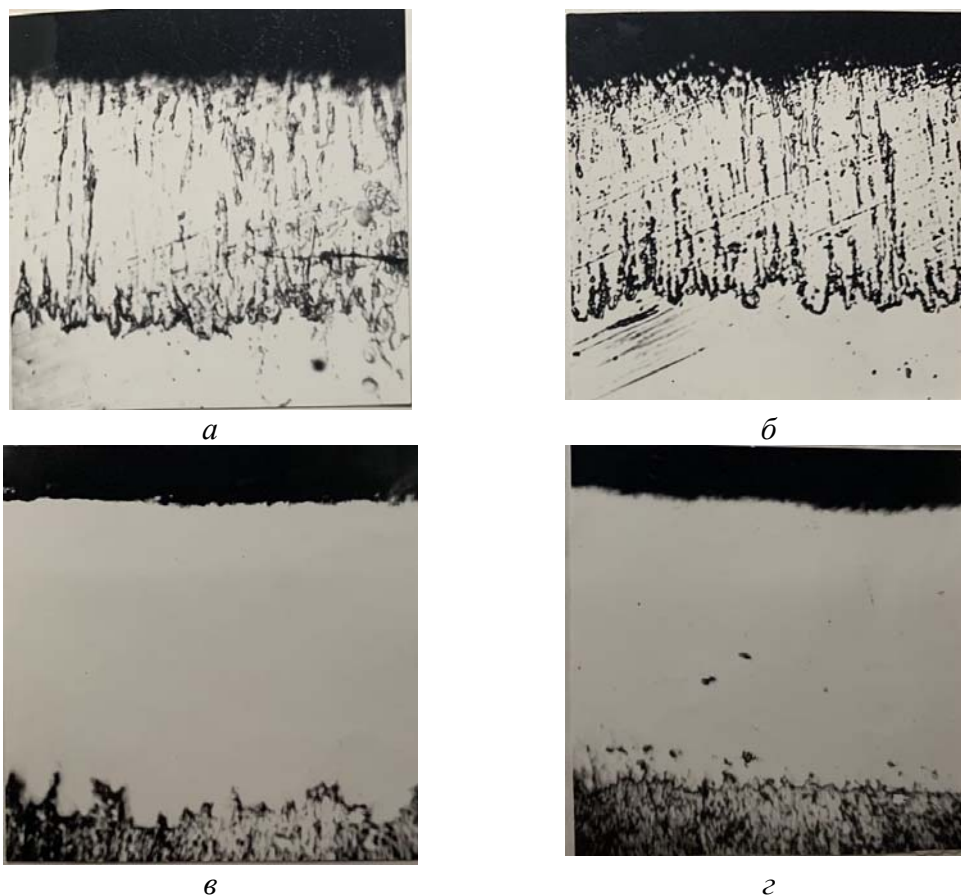


Рисунок 1 – Мікроструктура боридного покриття на тугоплавких металах, x800
а – вольфрам; б – молибден; в – ніобій; г – тантал. Травл. 50 % HNO_3 .
 $B_4C - 80\%$; $T = 1050\text{ }^\circ C$; $t = 6\text{ год.}$)

Джерело: розроблено авторами

В результаті взаємодії вуглецю з оксидами бору змінюється фазовий склад рідини і прискорюється відведення вуглецю від поверхні основи в розплав. У зв'язку з тим, у поверхневому шарі металу відбувається знеуглецювання і водночас прослідковується його переміщення вглибину металу. При наявності карбіду бору проходить і зустрічний процес – міграція атомів бору і вуглецю до міжфазової поверхні розплаву $B_2O_3 - B_2O_2$ – основа, оскільки швидкість дифузії вуглецю в тугоплавкому металі на два порядки є вищою, ніж бору, то спочатку відбувається науглецювання приповерхневого шару із розширенням двофазового прошарку $Me_2C - MeC$. Але як тільки почнеться реакція взаємодії B_2O_3 з карбідом металу, то поступлення вуглецю в

металеву основу різко обмежується. Отже, боридна фаза Me_2B проявляє функції дифузійного бар'єру. На поверхні тугоплавкого металу також проходить реакція диспропорціонування з утворенням атомарного бору, який дифундує в металеву основу. Спочатку відбувається поява твердого розчину бору в карбіді металу, а при збільшенні концентрації бору утворюється складна сполука типу $MeCB$. Бор поступово витісняє вуглець із карбідів і той переміщується в глибину металу. Підвищення концентрації бору в покритті приводить до послідовної зміни фаз у приповерхневому шарі металу. Боридний шар на тугоплавкому металі росте починаючи з фази Me_2B . З цього моменту фактично починається процес борування. Він проходить із великою швидкістю і не лімітує тривалість всього технологічного процесу. Присутність вуглецю і кисню в порошковому середовищі і в металевій основі впливає на фазоутворення, ріст товщини боридного шару, на процес формування покриття, а також на його характеристики критерія якості.

Силіціювання металів і сплавів у порошкових сумішах забезпечує одержання захисних жаростійких шарів, властивості яких залежать від складу, структури, якості і способу формування покриття [6, с. 19]. В зв'язку з простотою технологічного і апаратного оформлення широке розповсюдження одержав процес силіціювання металів і сплавів у контейнерах із плавким затвором. Дослідження процесу силіціювання тугоплавких металів у сумішах, у яких було від 5 до 80% кремнію і 3% фтористого натрію, показало, що на металах утворюється покриття, яке відповідає характеристикам критерія якості. Зменшення концентрації кремнію в суміші від 80 до 40% приводить до зменшення товщини шару дисиліцидних фаз на 10%. Водночас спостерігається покращення якісних характеристик покриття (рис.2).

Необхідно зазначити, що при силіціюванні металів у сумішах, які містять менше 40% кремнію, спостерігається зменшення товщини шару покриття, а також зміна його фазового складу. Після 6-годинної тривалості процесу ($1050\text{ }^{\circ}\text{C}$) на границі $MeSi_2$ – Me утворюється фаза Me_5Si_3 з товщиною шару 3–5 мкм. Незначне зменшення товщини шару дисиліцидних фаз на тугоплавких металах, можливо зв'язано з тим, що швидкість доставки атомів кремнію до зовнішньої границі покриття змінюється незначно, оскільки концентрація кремнію в суміші є досить великою і в силіцидному шарі забезпечується потрібний градієнт активності кремнію, який приводить до його безперервної дифузії в покритті на протязі всього процесу насичення. Відсутність нижчих силіцидних фаз при насиченні в сумішах, які містять від 40 до 80% кремнію, зв'язано з тим, що доставка дифузанта до зовнішньої границі покриття і швидкість його дифузії через шар такі, що на внутрішній границі забезпечується необхідне співвідношення компонентів для утворення тільки дисиліцидів тугоплавких металів.

Дослідження впливу температури на процес дифузійного силіціювання тугоплавких металів показало, що в інтервалі 950 – $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ формується однофазне покриття, яке складається із дисиліцидів металів $MeSi_2$. Необхідно зазначити, що подальше підвищення температури процесу насичення приводить до різкого росту товщини силіцидного шару. Особливо інтенсивно спостерігається ріст силіцидного покриття на вольфрамі. Відомо [1, с. 165], що дифузія кремнію у вольфрам може проходити не тільки по вакансіям власної підрешітки, але і поміж вузлах решітки фази WSi_2 . Із підвищенням температури процесу насичення збільшується кількість вакансій в металевій решітці, що дає можливість реалізувати естафетний механізм дифузії кремнію за участю вакансій двох решіток. Отже, сумісна дія двох механізмів дозволяє одержати на вольфрамі силіцидне покриття значно більшої товщини, ніж на других тугоплавких металах. Підвищення температури насичення (вище $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$) впливає не тільки на ріст товщини шару покриття, але і на його якість, зокрема, погіршується стан покритої поверхні, збільшується кількість і ширина радіальних тріщин, а також

спостерігається утворення крайового ефекту. Можна припустити, що це зв'язано з особливостями структуроутворення, об'ємними змінами і різницею коефіцієнтів термічного розширення силіциду і металевої основи, що приводить до виникнення внутрішніх напружень, які сприяють росту мікротріщин і утворенню інших дефектів.

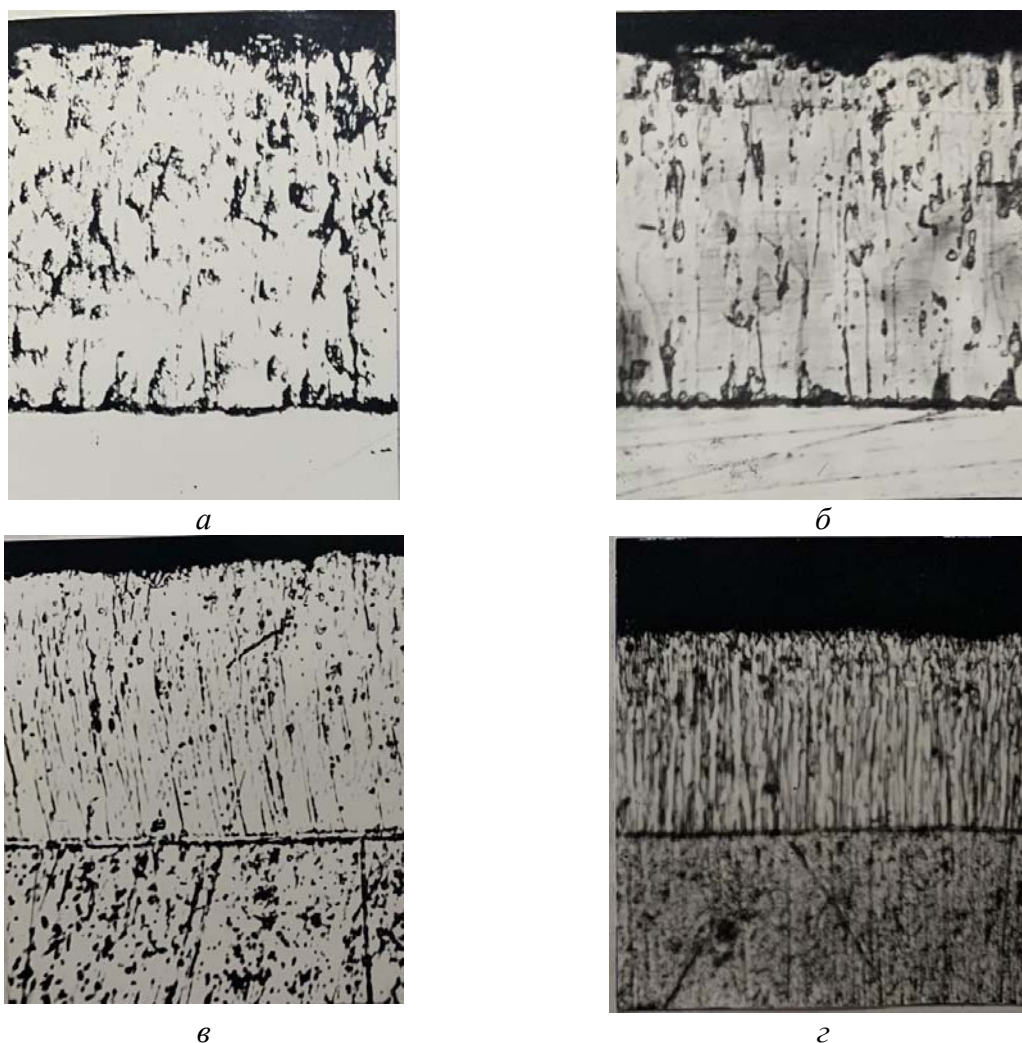


Рисунок 2. Мікроструктура силіцидного покриття на тугоплавких металах, x80
(а – вольфрам, б – молібден, в – ніобій, г – тантал; (Травл. HF: HNO₃: H₂ SO₄ = 1 : 1 : 1ч);
Si=40%, NaF = 3%, Al₂O₃ –решта.; T = 1050 °C, t = 6 год)

Джерело: розроблено авторами

На ніобії і танталі покриття має стовбчасту структуру. Величина кристалів дисиліцидних фаз по товщині шару змінюється незначно, лише тільки збільшення температури (вище 1050 °C) насичення приводить до їх росту. На молібдені і вольфрамі формується приповерхневий шар товщиною до 15 мкм, що має дрібнозернисту структуру, яка в глибині покриття переходить в стовбчасту.

На підставі результатів дослідів можна запропонувати механізм утворення структури покриття на тугоплавких металах. На початковій стадії формування шару покриття кристалографічний напрям [001] ще не є основним і ріст кристалів проходить переважно по інших напрямках, що приводить до росту дрібнозернистої структури дифузійного шару. Із ростом товщини шару фази MeSi₂ відбувається підсилення напрямку [001] і послаблення других напрямів. Це є наслідком реалізації принципу

геометричного відбору при нормальному рості кристалів дифузійного шару. Із збільшенням віддалі від границі покриття – основа збільшується кількість кристалів у яких напрям максимальної швидкості росту паралельний нормалі до металевої основи. Необхідно зазначити, що кристалографічний напрям $[001]$ співпадає з напрямом гвинтової вісі в структурах силіцидних фаз WSi_2 і $MoSi_2$. Він має максимальну швидкість росту при нормальному рості кристалів. Площини кристалу, які перпендикулярні гвинтовим вісям, мають найкращу адсорбційну здатність по відношенню до атомів, які поступають із газової фази. Переміщення дифундуючих атомів вздовж гвинтової вісі не вимагає утворення в процесі росту ступенів, які характерні для тангенціального пошарового росту кристалів. Можна припустити, що сформована структура забезпечує максимальну швидкість доставки атомів кремнію від зовнішньої границі покриття до внутрішньої. Такий процес приводить до формування стовбчастої структури. На границі розділу покриття – основа ріст стовбчастих кристалів фази $MeSi_2$ затруднений, оскільки в цій зоні відбувається процес утворення нової фази, що супроводжується збільшенням об'єму і кристали відчувають фазовий самонаклеп, який приводить до їх розорієнтації і дробленню, що підтверджується дослідженнями.

Дослідження процесу силіціювання в суміші з високим вмістом кремнію показало, що спостерігається погіршення якості покриття. Можна припустити, що це зв'язано з впливом домішок, які є в насичуючому середовищі і під час силіціювання одночасно з кремнієм дифундують у металеву основу. Під час силіціювання тугоплавких металів в суміші, що містить менше 40% кремнію, концентрація домішок насичуючому об'ємі мала і вони утворюють багатокомпонентний твердий розчин на основі фази $MeSi_2$. Це не викликає появи внутрішніх напружень у силіцидному покритті і порушення поверхневого шару не спостерігається. Збільшення вмісту кремнію (більше 80%) в суміші приводить до підвищення концентрації домішок у насичуючому середовищі, які в процесі силіціювання тугоплавких металів утворюють складні сполуки, внаслідок цього в покритті виникають зміни об'єму та поява внутрішніх напружень значної величини і в силіцидному шарі появляється значна кількість радіальних тріщин, що підтверджується результатами дослідів. Можна зробити висновок, що утворення тріщин в покритті залежить від концентрації домішок як в насичуючому середовищі, так і в тугоплавких металах.

Дослідження процесу силіціювання тугоплавких металів у порошковій суміші, яка містить кремній і фтористий натрій, дозволяє зробити висновок, що присутність домішок в насичуючому середовищі впливають на якість покриття, а домішки впровадження, що знаходяться в металевій основі підвищують ефективну енергію активації процесу формування силіцидного шару.

Висновки. Аналізуючи фундаментальні й актуальні шляхи підвищення жаростійкості елементів двигунів виготовлених із тугоплавких металів і їх сплавів встановлено, що ефективним дифузійним бар'єром є боридні фази тугоплавких металів, які забезпечують стабільність дифузійній частині багатокомпонентного покриття.

Вивчення властивостей боридних і силіцидних покриттів показало, що боридні фази по відношенню до металевої основи більш стабільні, ніж силіцидні. Завдяки утворенню на границі боридних і силіцидних шарів силікоборидних фаз забезпечується висока стабільність боросиліцидного покриття.

Присутність у металевій основі деталей домішок проникнення приводить до погіршення захисних властивостей оксидної плівки дифузійного покриття, внаслідок чого погіршується його довговічність. Запропоновано механізм перенесення домішок проникнення із глибини металу на границю з порошковим середовищем. Одержані технологічні параметри процесу насичення елементів двигунів виготовлених із

тугоплавких металів бором і кремнієм дозволяють сформувати на тугоплавких металах дифузійне покриття з дрібнозернистою структурою, а для забезпечення високих захисних властивостей необхідне проведення подальших досліджень щодо формування нашарованої частини покриття.

Список літератури

1. Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2016. 188 с.
2. Кицкай Л.І. Формування багатшарового покриття на ніобії і танталі для захисту їх від окислення : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”. Київ, 2020. 16 с.
3. Погребова І.С., Янцевич К.В. Вплив високотемпературного окислення на корозійну стійкість хромосиліційованої сталі 45 І. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2021. Вип. 6. С. 92-97.
4. Буряк М. В. Оцінка довговічності металоконструкцій автотранспортних засобів / М. В. Буряк та ін. *Вісник машинобудування та транспорту: зб. наук*. 2022. Том 15, №1. С. 11-16.
5. Електролітичні покриття сплавами заліза для зміцнення і захисту поверхні: монографія / Г.В. Каракуркчі, М.В. Ведь, І.Ю. Єрмоленко, М.Д. Сахненко. Харків : ФОП Панов А.Н., 2017 . 200 с.
6. Ковбашин В.І., Бочар І. Склад суміші для силіціювання та борування виробів із карбиду кремнію та дисиліциду молібдену . *Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. (Тернопіль, 10-11 листопада 2022 р.)* . Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. С. 18–20.
7. 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.

References

1. Afanasieva O.V. (2016). *Materialoznavstvo ta konstruktsiini materialy [Materials science and construction materials]*. Kharkiv: KhNURE [in Ukrainian].
2. Kytskai, L.I. (2020). Formuvannia bahatosharovoho pokryttia na niobii i tantali dlia zakhystu yikh vid okyslennia [Formation of a multilayer coating on niobium and tantalum to protect them from oxidation autoref]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
3. Pohrebova, I.S. & Yantsevych, K.V. (2021). Vplyv vysokotemperaturnoho okyslennia na koroziinu stiiikist khromosylitsiiiovanoi stali 45 I. [The effect of high-temperature oxidation on the corrosion resistance of chromosilicized steel 45 I]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky KrNU, Issue 6, 92-97* [in Ukrainian].
4. Buriak M. V. R. I. Rozum, O. P. Zakharchuk, P. B. Prohni, P. V. Popovych, O. S. Shevchuk (2022) . Otsinka dovhovichnosti metalokonstruktsii avtotransportnykh zasobiv [Assessment of durability of metal structures of motor vehicles]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu : zb. nauk. st. – Bulletin of mechanical engineering and transport: coll. of science, Vol. (15), 11-16* [in Ukrainian].
5. Karakurkchi, H.V., Ved, M.V., Yermolenko, I.Iu. & Sakhnenko, M.D. (2017). *Elektrolitychni pokryttia splavamy zaliza dlia zmitsnennia i zakhystu poverkhni [Electrolytic coatings with iron alloys to strengthen and protect the surface]* . Kharkiv : FOP Panov A.N. [in Ukrainian].
6. Kovbashyn, V.I. & Bochar, I. (2022). Sklad sumishi dlia sylitsiiuvannia ta boruvannia vyrobiv iz karbidu kremniiu ta dysylitsydu molibdeni [The composition of the mixture for silicification and boronization of products made of silicon carbide and molybdenum disilicide] . *Strength and durability of modern materials and structures : Mizhнародna naukovu-tekhnichna konferentsia (10-11 lystopada 2022 roku) – International science and technology conf. (pp. 18-20)*. Т. : FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
7. 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].

Yuriy Dzyadykevych, Assoc. Prof., DSc., **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
Viktor Shevchuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Lviv National University of Nature Management, Dublyany, Ukraine

The Use of Boride and Silicide Coatings in Fire engines: Technological Aspect

The main regularities of the process of forming on refractory metals the single-phase, multi-phase, multi-layer composite coatings with high heat resistance and durability are examined in the article.

A study of boride coating on refractory metals was conducted, which showed that a single-phase coating is formed on metals that possesses good adhesion to the base. Based on the results of X-ray phase and micro-X-ray spectral methods of analysis, the formation of a monoboride phase on molybdenum and tungsten and a boride phase on niobium and tantalum was revealed. A study of the effect of temperature on the process of diffusion silicification of refractory metals was carried out, which showed that in the range of 950–1100 °C, a single-phase coating is formed, which consists of disilicides of MeSi₂ metals. A further increase in the temperature of the saturation process was found to lead to a sharp increase in the thickness of the silicide layer. It was proved that an effective diffusion barrier is the boride phases of refractory metals, which ensure the stability of the diffusion part of the multicomponent coating. The boride phases were determined to be more stable than silicide phases in relation to the metal base. Due to the formation of silicoboride phases at the border of boride and silicide layers, high stability of the borosilicide coating is ensured. The presence of penetrating impurities in the metal matrix leads to poor protection of the oxide film of the diffusion coating and, as a result, to low durability. A mechanism for the transfer of penetrating impurities from the depth of the metal to the boundary of the powder medium is proposed.

The obtained borosilicate-saturated metal technological parameters allow forming a diffusion coating with a fine-grained structure on refractory metals. To ensure high protective characteristics, the formation of the layered part of the coating should be further researched.

engines, metal silicification process, metal boronization process, diffuse layer

Одержано (Received) 27.03.2023

Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2023

Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023

UDC 629.083

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.159-166](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.159-166)

Andrii Molodan, Prof., DSc., **Yevhen Dubinin**, Prof., DSc., **Oleksandr Polyanskyi**, Prof., DSc., **Mykola Potapov**, Assoc. Prof., PhD tech sci., **Maksim Krasnokutskyi**, post-graduate
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
e-mail: tmirm@ukr.net

Oleg Pushkarenko, post-graduate
State University of Biotechnology, Kharkiv, Ukraine
e-mail: oleggranit10011987@ukr.net

Method of Engine Energy Indicators Estimating when the Cylinders are Disconnected in the Loaded Mode of Operation

Considered modes engine load operations: 1 – test of the original engine; 2 – test with disconnection of four cylinders by stopping the fuel supply; 3 – test with disconnection of four cylinders with simultaneous cessation of fuel supply and absence of pumping losses of the cylinder-piston group (CPG) in the disconnected cylinders.

The feasibility of using the method of disconnecting a part of the working cylinders of the engine, saving fuel at load modes of no more than 70% of the total and with a further increase in the effective power of the engine load, the time consumption of fuel becomes higher than in the variant without disconnection of the cylinders, has been proven.

engine, energy parameters, cylinder shutdown, engine load, pumping losses

© Andrii Molodan, Yevhen Dubinin, Oleksandr Polyanskyi, Mykola Potapov, Maksim Krasnokutskyi, Oleg Pushkarenko, 2023