

Since the cargo (products) differ in their properties, certain requirements are imposed on the vehicle body for its transportation, in particular

- for sand, gravel - an open body is required;
- for cement, animal feed - a closed body with the possibility of constant mixing;
- for liquids (food and chemical products) - sealed tanks, in which the liquid should not react with the tank material;

- for perishable products - isothermal refrigerators that can be used for cooling or heating;

- for building materials, long materials, floor panels, a special frame structure is required.

Depending on the body design, it is possible to produce a frame, semi-frame or frameless body.

The cross-section of the body is selected for different cargoes based on the need to ensure a lower center of gravity of the cargo, complete unloading of the cargo, and the required structural rigidity.

An additional requirement for the design of bodies is compliance with specified thermal properties, which are achieved through the use of insulating materials and a cooling system.

Based on the data obtained from the analysis of the body design, taking into account the requirements for the transported cargo and operating conditions, it is possible to develop basic criteria for improving the quality of transportation and selecting rolling stock, both for each individual cargo, transportation in general, and for industry purposes.

freight vehicle, body, construction, method of execution

Одержано (Received) 14.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 18.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 621.793

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.153-158](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.153-158)

Ю.В. Дзядикевич, проф., д-р техн. наук, **Ю.М. Петришин**, асп., **М.Р. Башуцький**, асп., **М.В. Буряк**, доц., канд. техн. наук

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна

Дослідження захисту деталей автомобілів від високотемпературного окислення

Стаття присвячена проблемі дослідження перспективних напрямків дослідження захисту деталей машинних від високотемпературного окислення шляхом формування багатошарової композиції.

Провівши аналіз результатів проведених робіт, присвячених проблемі підвищення жаростійкості елементів конструкцій машин можна стверджувати, що перспективним захистом їх від високотемпературного окислення є багатошарова композиція. Вивчення процесу формування на деталях машин шлікерного композиційного покриття показало, що боридні фази стосовно металевої основи більш стабільні, ніж силіцидні. Завдяки утворенню на границі боридних і силіцидних, силікоборидних фаз забезпечується висока стабільність боросиліцидного покриття, можна застосовувати для виготовлення деталей машин які підпадають під вплив високих температур.

процес борування, багатошарові композиції, високолегованої сталі, підвищення експлуатаційних властивостей деталей

Постановка проблеми. Перспективним напрямом захисту деталей машин від високотемпературного окислення є поєднання різних методів нанесення покриття. Розробляючи високотемпературне захисне покриття, багато дослідників вважають, що такий захисний шар повинен виконувати цілий комплекс різних функцій. На наш погляд, такий підхід є помилковим, оскільки не сприяє підвищенню жаростійкості робочих поверхонь деталей двигуна.

© Ю.В. Дзядикевич, Ю.М. Петришин, М.Р. Башуцький, М.В. Буряк, 2023

Натомість підвищення жаростійкості деталей машин можливе шляхом формування на їх робочій поверхні композиції, що складається із дифузійної та нашарованої зон, у яких кожний окремий шар виконує визначену функцію. Наприклад, зовнішній, шлікерний шар забезпечує жаростійкість дифузійній композиції; бар'єрний – перешкоджає взаємодії дифузійної частини покриття з основою; дифузійний – сприяє релаксації напруги в покритті під час багаторазової зміни температурного режиму, а також покращує адгезію між дифузійною та нашарованою частинами композиційного покриття. Саме тому дослідження процесу формування композиційного покриття на деталях двигуна є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам дифузійного насичення сталених деталей і особливостям проходження процесу борування присвячені праці багатьох вітчизняних вчених, зокрема: Г.В. Самсонова, Т.Н. Серебрякової, В.А. Неронова, Б.М. Рудь [1], С.А. Князева [2], Н.Е. Погребної, В.З. Куцовой, Т.В. Котової [3] О.Г. Добровольського, Б.В. Борисовича, В.А. Косенка [4]; О.М. Гур'єва, Б.Д. Лигденова, Н.А. Попової, Е.В. Козлова [5]; Б.Д. Лигденова, А.М. Гур'єва, В.І. Мосора, В.А. Бутуханнова [6]; Ю.А. Мікаеляна [7]; Б.П. Середи, Д.Б. Середи, І.О. Бабки, І.Е. Зими, І.В. Білозора [8].

Зокрема, Г.В. Самсонов [1] зазначає, що бориди тугоплавких металів мають високу тугоплавкість, високу хімічну стійкість у різних агресивних середовищах і високу електро-і теплопровідність. Ці властивості є підставою для використання їх як складову частину багатошарового композиційного покриття.

Для формування жаростійкого шару високотемпературної композиції можна використати також силіцидні сполуки, здатні формувати на поверхні металу самозаліковуючу оксидну плівку.

Досліджуючи процес борування високолегованої сталі марки 15Н11М, С.А. Князев встановив [2], що індукційне нагрівання реакційної зони із швидкістю 100° С/с зумовлює значне скорочення тривалості процесу насичення (з 3 годин до 2 хвилин), а при температурі 1160 °С на зразках формується двофазне боридне покриття товщиною 110 мкм. Було встановлено, що індукційне нагрівання сталених зразків, покритих боридними пастами, дає змогу одержати на металевій поверхні твердий боридний шар товщиною 200 мкм. Це є альтернативою серед інших технологій хіміко – термічної обробки.

Важливим також є аналіз параметрів процесу насичення металів елементами впровадження, що підтверджує ефективність застосування хіміко-термічної обробки для підвищення експлуатаційних властивостей деталей [3].

О.Г. Добровольський, Б.В. Борисович, В.А. Косенко [4] вивчали процес борування сталених деталей у герметизованих контейнерах в захисних газах або у вакуумі. Процес проводили при температурі 900-950°С тривалістю 4-6 годин. Процес є складним і дорогим. Водночас порівняння властивостей покритих деталей свідчить про перспективність процесу борування.

Заслуговує на увагу проведений детальний фазовий і структурний аналіз боридного покриття, одержаного за різними режимами [5]. Досліджено та встановлено основні закономірності та механізми борування і карбоборування сталених зразків.

Перспективними є способи хіміко-термічної обробки [6], що дало змогу обґрунтувати можливі механізми формування фазового складу дифузійних покриттів при насиченні титаном, бором і хромом.

Микаелян Ю.А. не лише проаналізував існуючі способи борування металів і сплавів, а й розробив новий склад насичуючої суміші та режим хіміко-термічної

обробки, що забезпечило одержання достатньо глибокого і суцільного боридного шару на поверхні сталей [7].

Досліджено також і кінетику процесу одержання комплексного борохромоалітованого покриття на сталених зразках [8]. Встановлено, що при температурі процесу 105 °С за 60 хв. можна отримати борохромоалітовані покриття товщиною 45-80 мкм із мікротвердістю $15-17 \times 10^3$ МПа.

Однак, у літературних джерелах недостатньо висвітлено чинники, які впливають на процес формування на робочій поверхні деталей машин багатошарового покриття, яке має комплекс фізико-хімічних і механічних властивостей. Це зумовило необхідність їх подальшого вивчення.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження закономірностей процесу формування на металевій основі багатошарової композиції, яка забезпечує високу жаростійкість деталей двигуна.

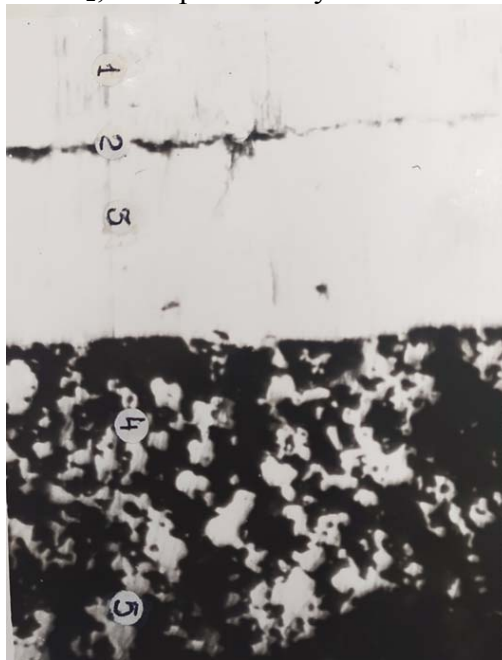
Виклад основного матеріалу дослідження. Вище проведені дослідження свідчать про те, що ресурс роботи боросиліцидного покриття на металевих деталях залежить від високотемпературної стабільності боридних фаз, оскільки вони сповільнюють перетворення силіцидних фаз $MeSi_2$ в Me_5Si_3 , а також від товщини силіцидного шару, який є обмежуючою ланкою при формуванні захисної плівки такої товщини, яка запобігає дифузії кисню в глибину металевої основи. Нанесення на леговані сталі боросиліцидного покриття з товщиною силіцидного шару більше 300 мкм є недоцільним, оскільки спостерігається його відшарування від металевої основи. Жаростійкість покриття можна підвищити шляхом застосування шлікерного методу, як для збільшення товщини покриття, так і введення більш жаростійких компонентів, наприклад, таких як дисиліцид молібдену і вольфраму.

З метою дослідження впливу різного роду добавок на процес формування захисного покриття на деталях машин, попередньо було сформовано боросиліцидне покриття, на яке було нанесено шар шлікера із дисиліцида молібдена товщиною 120 мкм. Для приготування суспензії використано порошок дисиліцида молібдена зернистістю менше 40 мкм. Боросиліцировані зразки з нанесеним силіцидним шаром спочатку просушували, а потім обпікали при 140⁰С протягом 15 хвилин. Металографічний аналіз покритих зразків показав, що запропонований технологічний режим забезпечує надійне закріплення шлікерного шару по всій поверхні дифузійного покриття. У випадку нанесення на боросиліцидовані зразки суспензії товщиною більше 120 мкм, то після термообробки спостерігається відшарування шлікерного покриття від боросиліцидної поверхні. Отже, товщина шлікерного шару покриття не повинна перевищувати 120 мкм.

Попередньо проведені дослідження показали, що підвищення температури експлуатації дифузійно-шлікерної композиції вище 1400⁰С призводить до різкого зменшення ресурсу роботи покриття у зв'язку з втратою дисиліцидом молібдена захисних властивостей. Підвищити опір окисленню шлікерної частини покриття можливо шляхом уведення в покриття компонентів, які мають високу температуру плавлення, низьку пружність парів дисоціації, не утворюють легкоплавких сполук із елементами, що входять, як у склад окислювального середовища, так і в склад захисного покриття. Таким вимогам задовольняють: оксид цирконію, гафнію, ітрію, алюмінію та ін. Ураховуючи це, для розробки високотемпературної композиції як наповнювач доцільно використати цирконієво-ітрієву кераміку ЦІС-2. Основою може слугувати дисиліцид молібдену, який забезпечує надійне закріплення композиції на поверхні спеченого силіцидного шару. Необхідно зауважити, що шлікерне покриття повинно мати хорошу покривну датність. У зв'язку з тим, у склад силіцид-оксидної

композиції необхідно ввести речовину, яка має хороші клеючі властивості. Такою речовиною може бути натрій алюмінат, який також відповідає вимогам, що висуваються до компонентів наповнювача.

Попередньо проведені нами досліді щодо вибору інгредієнтів композиції показали, що використання в суміші, менше 60% MoSi_2 погіршує закріплення високотемпературного шару. Встановлено, що найбільш якісним є перший шлікерний шар товщиною до 250мкм, який містить (мас.%) MoSi_2 -60, ЦІС-2 -30, і NaAlO_2 -10. Металографічний аналіз покритих зразків показав, що багатошарове шлікерне покриття – це композиція на основі MoSi_2 , яка армована тугоплавкими оксидами (рис.1).



1 – основа; 2 – MoB ; 3 – MoSi_2 ; 4 – силіцидна суміш; 5 – суміш оксидів

Рисунок 1 – Мікроструктура багатошарового покриття на легованій молібденом сталі, $\times 400$. Травлення. $\text{HF}:\text{H}_2\text{SO}_4=1:1:1$

Джерело: розроблено авторами

З метою підвищення жаростійкості та ресурсу роботи багатошарової композиції кожний її наступний її шар містив на 20% більше оксидної кераміки за рахунок зменшення кількості дисиліцида молібдена

Сформульовані технологічні основи одержання високотемпературних багатошарових покриттів можуть розповсюджуватися і на неметалеві матеріали, зокрема, графіт, бориди, оксиди, силіциди і карбіди. Одним із її напрямів є підвищення жаростійкості виробів із карбіда кремнію шляхом нанесення на їх поверхню захисного шару. Для формування покриття використовують суспензію, що містить 80 % карбіду кремнію і 20 % високоякісного бентоніту, яку відпалюють на повітрі при 1300°C . Покриття надійно захищає керамічну конструкцію від високотемпературної газової корозії. При експлуатації кераміки в області високих температур наявність нез'язаного кремнію призводить до утворення значної кількості SiO_2 . Підвищити жаростійкість карборундових конструкцій можливо шляхом нанесення на їх поверхню газонепроникного шару із карбіду кремнію товщиною 100 мкм. Водночас необхідно зазначити, що цей спосіб дуже складний у технологічному оформленні.

Отже, запропонована обробка співпадає із технологічною рекомендацією щодо формування багатошарового покриття.

Рентгенофазовий аналіз борованої кераміки показав, що після обробки вона містить також бориди кремнію: SiB_4 і SiB_6 . Встановлено, що багатошарове покриття мало чутливе до перегріву. Високий опір окисленню забезпечується завдяки утворенням плівки, що містить низку тугоплавких оксидів. На підставі проведених дослідів було встановлено, що ефективний захист металевої конструкції можливий у тому випадку, якщо попередньо на металеву конструкцію нанести багатошарову композицію, компоненти якої мають високу температуру плавлення, низьку пружність дисоціації, не утворюють при температурі експлуатації летких і легкоплавких сполук, а також створення на їх поверхні захисної плівки шляхом попереднього високотемпературного окислення. Розроблені технологічні регламенти процесу нанесення на деталі машин захисного покриття дозволяють витримувати перегрівання в декілька сотень градусів.

Висновки. На підставі узагальнення та аналізу результатів робіт, присвячених проблемі підвищення жаростійкості елементів конструкцій машин встановлено, що перспективним захистом їх від високотемпературного окислення є багатошарова композиція. Вивчення процесу формування на деталях машин шлікерного композиційного покриття показало, що боридні фази стосовно металевої основи більш стабільні, ніж силіцидні. Завдяки утворенню на границі боридних і силіцидних, силікоборидних фаз забезпечується висока стабільність боросиліцидного покриття. Таке покриття слід застосовувати для виготовлення деталей високотемпературної техніки.

Список літератури

1. Knyazev S.A. Features of structure formation of surface layers with high content of boron S.A on steel 15X11MF in the conditions of furnace and induction heating. *Ceramics: science and life*. 2020. № 2(47). p. 26–30.
2. Биковський О.Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій: підручник. К.: Основа, 2021. 400 с.
3. Вплив агресивних середовищ на експлуатаційні характеристики матеріалів несучих конструкцій колісних транспортних засобів / М.В. Буряк та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023 Вип. 7(38), ч.І. С. 143 - 150.
4. Дзяди́кевич Ю.В. Захист елементів двигунів транспортних засобів від окислення: технологічний аспект / Ю.В. Дзяди́кевич та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023 Вип. 7(38), ч.І. С. 151 - 159.
5. Добровольський О.Г., Борисович Б.В., Косенко В.А. Борування – ефективний спосіб захисту деталей від абразивного зношення. *ГБДММ*. 2012. №79. С. 73–78.
6. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: навч. посіб. Дніпро: НМетАУ, 2021. 89 с.
7. Лигденюв Б.Д., Гур'єв А.М., Мосоро В.І., Бутуханов В.А. Перспективні дифузійні покриття : монографія. Lulu Press . 2015. 131 с.
8. Отримання борованих покриттів в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу для деталей газорозподільного механізму двигунів внутрішнього згорання автомобілів / Б.П. Серета та ін. *ДДТУ : зб. наук. праць*. 2021. Т. 1, № 38. С.60-64.
9. Рудченко О.Ю., Поліщук О.М. Механізм державного регулювання транспортної інфраструктури мегаполісів. *Університетські наукові записки*. 2017. № 6. С. 93-100.
10. Січкач Д. Транспортна галузь у 2020 році. *Європейської Бізнес Асоціації*: веб-портал. 2020, 22 грудня. URL: <https://eba.com.ua/transportna-galuz-u-2020-rotsi/> (дата звернення: 08.05.2022).

Reference

1. Knyazev, S.A. (2020). Features of structure formation of surface layers with high content of boron S.A on steel 15X11MF in the conditions of furnace and induction heating. *Ceramics: science and life*, 2(47), p.26–30 [in English].

2. Bykovs'kyy, O.H. (2021). *Zvaryuvannya, rizannya y kontrol' yakosti pid chas vyrobnytstva metalokonstruktsiy [Welding, cutting and quality control during the production of metal structures]* . Kyiv: Osnova [in Ukrainian].
3. Buryak, M.V. et al. (2023). Vplyv ahresyvnykh seredovyshch na ekspluatatsiyni kharakterystyky materialiv nesuchykh konstruktsiy kolisnykh transportnykh zasobiv [The influence of aggressive environments on the operational characteristics of materials of load-bearing structures of wheeled vehicle]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, Issue 7(38), part. I*, 143- 150 [in Ukrainian].
4. Dzyadykevych, Yu.V. et al. (2023). Zakhyst elementiv dvyhuniv transportnykh zasobiv vid okyslennya: tekhnolohichnyy aspekt [Protection of vehicle engine elements from oxidation: technological aspect] . *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, Issue 7(38), part. I*, 151- 159 [in Ukrainian].
5. Dobrovol's'kyy, O.H, Borysovykh, B.V. & Kosenko, V.A. (2012). Boruvannya – efektyvnyy sposib zakhystu detaley vid abrazyvnoho znoshennya [Boring is an effective way to protect parts from abrasive wear]. *HBDMM – GBDMM, 79*, 73–78 [in Ukrainian].
6. Pohrebna, N.E., Kutsova, V.Z. & Kotova, T.V. (2021). *Sposoby zmitsnennya metaliv [Methods of strengthening metals]*. Dnipro: NMetAU [in Ukrainian].
7. Lyhdenov, B.D., Hur"yev, A.M., Mosoro, V.I. & Butukhanov, V.A. (2015). *Perspektyvni dyfuziyni pokryttya [Promising diffusion coatings: monograph]*. Lulu Press [in Ukrainian].
8. Sereda, B.P., Sereda, D.B., Babko, I.O., Zyma, I.E. & Bilozor, I.V. (2021). Otrymannya borovanykh pokryttiv v umovakh samorozpovsyudzhuval'noho vysokotemperaturnoho syntezu dlya detaley hazorozpodil'noho mekhanizmu dvyhuniv vnutrishn'oho z'horannya avtomobiliv [Obtaining boron coatings in the conditions of self-propagating high-temperature synthesis for parts of the gas distribution mechanism of internal combustion engines of cars.]. *DDTU : zb. nauk. prats' – Coll. of science works of DDTU, Vol. 1,38*, 60-64[in Ukrainian].
9. Rudchenko, O.Yu. & Polishchuk, O.M. (2017). Mekhanizm derzhavnoho rehulyuvannya transportnoyi infrastruktury meghopolisiv [The mechanism of state regulation of the transport infrastructure of megacities]. *Universytet-s'ki naukovi zapysky – University scientific notes, 6*, 93-100 [in Ukrainian].
10. Sichkar, D. (2020). Transportna haluz' u 2020 rotsi. Veb-portal Yevropeys'koyi Biznes Asotsiatsiyi. 22 hrudnya [Transport industry in 2020. European Business Association: web portal. 2020, December 22]. *eba.com.ua*. Retrieved from <https://eba.com.ua/transportna-galuz-u-2020-rotsi/> [in Ukrainian].

Yuriy Dzyadykevich, Prof., DSc., **Yury Petryshyn**, post-graduate, **Mihayno Bashutskyi**, post-graduate, **Mykola Buryak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Research on Protection of Car Parts from High-temperature Oxidation

The article is devoted to the problem of investigating promising directions for protecting machine parts from high-temperature oxidation through the formation of a multilayer composition.

Analyzing the results of conducted research on increasing the heat resistance of machine structural elements, it can be concluded that a multilayer composition is a promising protection against high-temperature oxidation. The study of the process of forming a slurry-based composition coating on machine parts has shown that boride phases are more stable compared to silicide phases with respect to the metallic substrate. The formation of boride-silicide and silicoboride phases at the interface ensures high stability of the borosilicide coating, making it suitable for manufacturing machine parts that are exposed to high temperatures.

Based on the generalization and analysis of the results of works devoted to the problem of increasing the heat resistance of the elements of machine structures, it was established that a promising protection against high-temperature oxidation is a multilayer composition. The study of the forming process on the parts of the slip-composite coating machines showed that the boride phases are more stable in relation to the metal base than the silicide phases. Due to the formation of boride and silicide, silicoboride phases at the border, high stability of the borosilicide coating is ensured. Such a coating should be used for the manufacture of high-temperature equipment parts.

boronizing process, multi-layer compositions, high-alloy steel, improvement of operational properties of parts

Одержано (Received) 10.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 17.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023