

УДК 621.791

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-9>

ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО УСТАТКУВАННЯ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Пашинський Володимир Вікторович,

доктор технічних наук, доцент,

професор кафедри матеріалознавства, механіки та природничих наук

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-0118-4748

Бойко Ігор Олександрович,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри матеріалознавства, механіки та природничих наук

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-7742-4694

В роботі представлено результати аналізу сучасних досліджень в напрямках розробки перспективних матеріалів для наплавлення деталей металургійного устаткування, до яких висуваються вимоги високої стійкості при абразивному зношуванні (деталі завантажувальних пристроїв доменних печей, газорозподільних клапанів, бункерів та сит). Базовими системами для таких застосувань є Fe – Cr – C, Fe – Cr – C – B, Ni – Cr – C – B, які додатково легуються сильними карбідоутворюючими елементами (Mo, W, V, Nb, Ti).. При виборі матеріалів слід враховувати, що реальні характеристики матеріалів для наплавлення залежать не тільки від хімічного складу, але й від мікроструктури, яка сформувалася в процесі наплавлення. Крім хімічного складу, ефективним інструментом керування формуванням мікроструктури та комплексу властивостей сплавів є за управління енергетичними параметрами процесу формування покриття, температурний режим наплавлення, геометричні параметри шарів при багатшаровій структурі покриття. Запропоновано виділити основні групи матеріалів для наплавлення: економічно легуювані високохромисті високовуглецеві матеріали на основі заліза, високохромисті матеріали з додатковим легуванням сильними карбідоутворюючими елементами для роботи при високих температурах У випадках, коли велике значення має збереження твердості, зносостійкості та стійкості до термоциклічного навантаження напавленого шару при високих температурах, перспективними є сплави на нікелевій основі. В умовах відносно низьких температур перспективними є низьковуглецеві матеріали з пониженим вмістом хрому, зносостійкість яких забезпечується формуванням не тільки карбідної фази, але й твердої мартенситної матриці. Наведені приклади конкретних матеріалів вказаних груп для наплавлення.

Ключові слова: наплавлення, твердість, зносостійкість, карбіди, бориди, аустенітна матриця, мартенситна матриця, тріщини розвантаження, теплостійкість, механічна обробка.

Pashynskiy Volodymyr, Boyko Igor. The choice of materials for hardfacing of metallurgical equipment parts, working at abrasive wear conditions at high temperatures

The paper presents the results of the modern research analysis in the areas of development of promising materials for surfacing of metallurgical equipment parts, which require high resistance to abrasive wear (parts of blast furnace loading devices, gas distribution valves, bunkers and sieves). The basic systems for such applications are Fe – Cr – C, Fe – Cr – C – B, Ni – Cr – C – B, which are additionally alloyed with strong carbide-forming elements (Mo, W, V, Nb, Ti). When choosing materials, it should be considered that the real characteristics of materials for surfacing depend not only on the chemical composition, but also on the microstructure formed during the surfacing process. In addition to the chemical composition, an effective tool for controlling the formation of the microstructure and the complex of alloy properties is the control of the energy parameters of the coating formation process, the surfacing temperature regime, and the geometric parameters of the layers in a multilayer coating structure. It is proposed to distinguish the main groups of materials for surfacing: economically alloyed high-chromium high-carbon materials based on iron, high-chromium materials with additional alloying with strong carbide-forming elements for operation at high temperatures. In cases where the keeping of hardness, wear resistance and resistance to thermocyclic loading of the surfacing layer at high temperatures is of great importance, nickel-based alloys are promising. In conditions of relatively low temperatures, low-carbon materials with a reduced chromium content are promising, the wear resistance of which is ensured by the formation of not only a carbide phase, but also a hard martensitic matrix. Examples of specific materials of the specified groups for the surfacing are given.

Key words: surfacing, hardness, wear resistance, carbides, borides, austenitic matrix, martensitic matrix, unloading cracks, high temperature strength, machining.

Вступ. У даній роботі будуть представлені результати досліджень, метою яких було визначення сучасних тенденцій у розробці матеріалів для зносостійкого наплавлення деталей металургійного устаткування, які працюють в умовах абразивного зношування в поєднанні з впливом високих температур (до 650–700 °С) та агресивного газового середовища. Це, зокрема, деталі завантажувальних пристроїв доменних печей, газорозподільних клапанів, бункерів та сит. Вони працюють в контакт з високоабразивними шихтовими матеріалами, але температура цих матеріалів, їх абразивні характеристики питомі навантаження, хімічна активність шихти та газового середовища можуть змінюватися в широких межах. Це вимагає вибору матеріалу для наплавлення з урахуванням умов роботи конкретної деталі. Додатковими факторами є також велика матеріалоємність багатьох деталей та технологічна складність їх заміни у випадку виходу з ладу. Тому виникають суперечливі вимоги до зниження ціни матеріалу для наплавлення та одночасного забезпечення високої надійності наплавленого шару та високої продуктивності процесу наплавлення.

Вищезгадані особливості деталей, що наплавляються, утруднюють, або роблять неможливим проведення натурних експериментів безпосередньо на промислових агрегатах. Тому важливо частиною процесу вибору матеріалу наплавленого шару є аналіз наявної науково-технічної інформації з метою визначення найбільш перспективних систем для подальшого експериментального дослідження. В літературі існує великий об'єм інформації щодо можливих варіантів технологій наплавлення та складу матеріалів, які для цього використовуються.

В роботі [1] детально розглянуті процеси наплавлення, які включають плазмове дугове наплавлення, наплавлення під флюсом, лазерне наплавлювання, процеси, пов'язані з дуговим наплавленням з використанням трубчастих дротів, киснево-ацетиленове полум'яне наплавлення. При цьому, в якості основних матеріалів, розглянуті порошкові дроти та стрічки на основі двох систем, що використовуються для зносостійких наплавлень: нікелевій основі з додаванням частинок карбіду вольфраму та залізній основі, в якій карбіди хрому типу M_7C_3 утворюють зародки під час затвердіння. В роботі [2] значна увага присвячена проблемам легування цих базових систем для підвищення їх ефективності при експлуатації у конкретних умовах. Було проведено систематичний огляд для вивчення впливу різних

легуючих елементів, включаючи бор, вуглець, хром, марганець, молібден, ніобій, рідкісноземельні елементи, кремній, титан та ванадій, на характеристики зносостійких покриттів сплавів на основі заліза. Автори роботи дають рекомендації щодо перспективних систем легування.

Вказаний підхід знаходить розвиток у роботах присвячених експериментальному дослідженню перспективних систем легування. Так, в роботі [3] проаналізовано новий тип зносостійкого сплаву з системою Fe-Cr-C-Mo-W. Встановлено, що бор заміщує вуглець у карбідах M_7C_3 та Mo_2C , утворюючи карбід $M_7C_{3-x}B_x$ та $Mo_2(C_{1-x}B_x)$. Встановлено, що елемент В у сплавах для наплавлення виконує дві ролі: перша – це заміщення у твердому розчині елемента С, який має близький атомний номер до В, і, нарешті, утворення $M_7C_{3-x}B_x$ та $Mo_2(C_{1-x}B_x)$ у сплавах. Друга роль – це утворення твердих фаз M_2B , розподілених у сплавах. Метою роботи [4] було отримання зносостійкого покриття шляхом наплавлення порошковими електродами багатокомпонентної системи Fe-Ti-Mo-W-Cu. Методом рентгеноструктурного фазового аналізу встановлено, що в сплаві крім складних карбідів та боридів формуються також карбіди титану TiC, які грають роль центрів зародження інших твердих фаз.

У випадках, коли велике значення має збереження твердості та зносостійкості наплавленого шару при високих температурах, перспективними є сплави на нікелевій основі. В роботі [5] показано, що використання сплаву на основі нікелю Colmonoy 6 з буферним шаром SS-309L на сталі P91 (CoSP91) забезпечує покращену зносостійкість на 67% за підвищених температур (600°C) Це збільшення зумовлене утворенням твердих фаз Cr_7C_3 , Cr_2B та Cr_5B_3 , а також захисного оксидного шару, які разом покращують зносостійкість.

Таким чином, розвиток матеріалів для наплавлення привів до появи складнолегованих варіантів системи Fe – Cr – C, Fe – Cr – C – B, Ni – Cr – C – B. Але важливим моментом є встановлений багатьма дослідниками факт, що реальні характеристики матеріалів для наплавлення залежать не тільки від хімічного складу, але й від мікроструктури, яка сформувалася в процесі наплавлення. На це звертали увагу автори робіт [3; 4; 6]. Мікроструктурні дослідження наплавленого шару, проведені в роботі [6], показали, що мікроструктура сплаву складається з великої об'ємної частки первинних карбідів ніобію, хаотично розподілених в евтектичній матриці, що складається з метастабільного аустеніту (γ) та евтектичних карбідів M_7C_3 ,

а також з високої об'ємної частки первинного M_7C_3 . Випробування на абразивне зношування при низьких та високих напруженнях показали, що розроблений наплавлений сплав Fe–Cr–C–Nb демонструє покращену стійкість до абразивного зношування порівняно зі звичайним високовуглецевим/високохромовим сплавом для наплавлення з вищою твердістю та вищою об'ємною часткою первинного M_7C_3 .

В роботі [7] автори цілеспрямовано керували структуроутворенням шляхом зниження температури наплавленого шару перед нанесенням неступного та використовували фінальну обробку холодом. Встановлено, що температура кінцевого охолодження показала значний вплив на фазовий склад матриці. Покриття, охолоджені повітрям, демонстрували аустенітну матрицю, тоді як наплавлений шар, охолоджений до $-125\text{ }^\circ\text{C}$ рідким азотом, демонстрував змішану матрицю аустеніту та мартенситу. Такий шар продемонстрував найкращу зносостійкість, яка була в 2,05 рази вищою, ніж у нанесеного за звичайною технологією.

Значний інтерес мають результати, отримані авторами роботи [8], в якій досліджувалась можливість керування мікроструктурою сплаву за рахунок зміни енергетичних параметрів процесу нанесення покриття. Зварювальний струм у режимі плазмового нанесення покриття ефективно формує евтектичні мікроструктури в плакуванні з складнолегованого матеріалу для наплавлення системи Fe–Co–Ni–Cr–Mo. Дисперсна пластинчаста евтектична структура $\sigma/\text{ГЦК}$ досягається при оптимізованому струмі 135 А. Евтектична структура демонструє добру стійкість до впливу високої температури та стабільні характеристики опору зношуванню.

Аналогічний підхід був використаний авторами роботи [9] при використанні методу дугового наплавлення сплаву системи Fe – Cr – C – B в роботі був використаний високолегований порошковий дріт, з високою концентрацією C та Cr, що використовується для отримання багатшарового наплавлення на низьковуглецеву сталеву основу. Високолегований порошковий дріт збільшив твердість зі 140 до 700 HV шляхом формування карбідів великої кількості карбідів типу M_7C_3 . Були ідентифіковані механізми формування мікроструктури, які безпосередньо визначаються хімічним складом дроту в поєднанні з геометричними параметрами шарів, що наплавляються та кінетику процесу наплавлення. Ці результати є багатообіцяючими, оскільки вони можуть розширити потенційне застосування твердосплавних матеріалів там, де потрібне покращене поглинання енергії.

Ще одним важливим моментом є встановлена авторами роботи [10] залежність зносостійкості твердих наплавлених матеріалів від питомого навантаження при зношуванні. В роботі досліджували зношування твердого наплавлення на основі Fe–Cr–C та складного сплаву Fe–Cr–Mo–Nb–W–C як за кімнатної температури, так і за $500\text{ }^\circ\text{C}$, під різними нормальними навантаженнями для моделювання різних умов експлуатації. Наплавлення Fe–Cr–C демонструє виражену реакцію на зростання навантаження, тоді як комплексний сплав демонструє порівняно незначні зміни зі збільшенням навантаження. Підвищення температури до $500\text{ }^\circ\text{C}$ знижує швидкість зношування обох матеріалів, що пояснюється підвищеною пластичністю наплавлень Fe–Cr–C за підвищеної температури, але складнолегований сплав зберігає вищу зносостійкість.

В результаті аналізу інформації можна зробити висновок, що для підвищення ресурсу роботи деталей металургійного устаткування перспективним є використання складнолегованих сплавів на основі систем Fe – Cr – C з додатковим легуванням сильними карбидоутворювачами – Mo, W, Nb. У випадку, коли деталі працюють в умовах термоциклічного навантаження і до них висувається вимога забезпечення герметичності, більш перспективним є використання сплавів системи Fe – Cr – C – Ni, або системи Cr – C – Ni – B.

Задачею даного дослідження було визначення конкретних марок сплавів, які є доступними на ринку, та розробка рекомендації по їх використанню в практиці виготовлення та відновлення деталей металургійного устаткування.

Матеріали та методи дослідження. Пошук перспективних марок матеріалів для наплавлення виконували шляхом аналізу пропозицій компаній – виробників матеріалів для наплавлення з урахуванням практики металургійних та ремонтних підприємств. При виборі матеріалів також враховували їх технологічність, та можливість виготовлення у потрібному форм-факторі (дрот або стрічка).

Результати та їх обговорення. Аналіз літературних даних та інформації, доступної в мережі, показав, що основними виробниками матеріалів для наплавлення, які відповідають критеріям, визначеним вище, є ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК», DURUM Verschleißschutz GmbH, Corodur Fülldraht GmbH, Voestalpine Bohler Welding, Kladox Ltd. Важливо відзначити, що виробництво матеріалів для наплавлення у форм факторі порошкової стрічки широко представлено лише у компанії ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК», тоді як інші

компанії зосереджені на виробництві матеріалів для наплавлення у вигляді порошкового дроту діаметром 1,6 – 2,8 мм. Матеріал у формі стрічки дозволяє потенційно забезпечити вищу продуктивність процесу наплавлення, що є конкурентною перевагою при наплавленні великогабаритних деталей, наприклад конусів завантажувальних пристроїв доменних печей.

Аналіз сортаменту продукції виробників показав, що матеріали для наплавлення з урахуванням вимог до деталей металургійного устаткування можна розділити на такі основні групи.

Матеріали з економним легуванням та максимальною зносостійкістю при помірних (< 400 °С) температурах. Вони базуються на системі Fe – Cr – C. Хімічний склад типових марок матеріалів приведено в таблиці 1.

Якщо деталі мають працювати при температурах 600–750 °С, перспективними виглядають більш леговані варіанти матеріалів на основі заліза, склад яких наведений в таблиці 2.

Обидві групи сплавів забезпечують отримання твердості наплавленого шару не нижче 62 – 63 HRC, яка виключає можливість механічної обробки наплавленого шару, можливе тільки шліфування абразивним інструментом. Також

особливістю наплавленого шару є виникнення так званих «тріщин розвантаження» внаслідок значної різниці у коефіцієнтах температурного розширення ферито-перлітного матеріалу основи деталі та аустеніто-карбідного наплавленого шару. Це явище не знижує зносостійкості шару, але утруднює виготовлення газощільних вузлів устаткування внаслідок розгерметизації по тріщинам. Крім того, газощільні вузли виготовляються із значним об'ємом механічної обробки контактних поверхонь. Тому для таких деталей перспективними є матеріали на залізо-нікелевій та нікелевій основі. Склад таких матеріалів наведений в таблиці 3.

Додатковою перевагою матеріалів на нікелевій основі є висока корозійна стійкість та можливість роботи при температурах 600–750 °С. Але такі матеріали значно дорожчі за сплави розглянуті раніше матеріали на основі заліза. Тому, якщо умови експлуатації не пов'язані з дією високих температур, перспективною виглядає система Fe – Cr – C зі зниженим вмістом вуглецю та хрому. Приклади хімічного складу таких матеріалів наведені у таблиці 4. Додатковою перевагою цієї системи є її висока технологічність при обробці різанням та низька схильність до утворення «тріщин розвантаження».

Таблиця 1

Хімічний склад економнолегованих матеріалів на основі заліза для наплавлення (% ваг.)

Марка	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	V	W	B
SK A43-O	5,6	1,3	0,2	20	-	6,7			
DURMAT FD 64	4,5	1,0	1,5	24	-	-	0,8	0,8	1,0
KLADEX W37-O	5,0	1,2	0,2	22	-	6,5	-	-	0,9
ПЛ АН 180	4,5	-	-	30	1,0	-	-	-	-

Таблиця 2

Хімічний склад теплостійких матеріалів на основі заліза для наплавлення (% ваг.)

Марка	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	V	W	B
SK A45-O	5,3	0,7	0,2	21	5,3	6,1	1,0	1,9	-
DURMAT FD 65	5,2	1,0	0,4	21	7,0	7,0	1,0	2,0	-
ПЛ АН 179	5,0	-	-	22	6,0	7,0	1,0	2,0	-

Таблиця 3

Хімічний склад матеріалів на основі нікелю для наплавлення деталей, що потребують механічної обробки (% ваг.)

Марка	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	V	W	B
COROLOY 1/58	0,75	4,7	-	20	Осн.	-	-	-	-	3,2
COROLOY 12/50	0,6	4,9	-	20	Осн.	2,5	-	-	-	2,8
ПЛ АН 111	5,0	2,5	1,0	38	38	-	-	-	-	0,3

Таблиця 4

Хімічний склад матеріалів на основі заліза з мартенситною матрицею для наплавлення (% ваг.)

Марка	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	V	W	B
KLADEX L55-O	0,5	2,2	2,2	8	-	-	-	-	-
ROBOTIC 600	0,45	0,4	3,0	9	-	-	-	-	-
ROBOTIC 603	0,5	1,1	1,0	6	1,3	-	0,3	1,3	-

Це пов'язано з формуванням мартенситної матриці сплаву з близьким коефіцієнтом термічного розширення до матеріалу основи деталей.

Висновки. В результаті проведеного аналізу були визначені сучасні тенденції в розробці матеріалів для наплавлення деталей металургійного устаткування і визначений склад перспективних матеріалів для наплавлення в залежності від умов експлуатації та технічних вимог до деталей устаткування.

На основі аналізу літературних даних та з урахуванням практичного досвіду можна стверджувати, що кінцева структура і комплекс властивостей наплавлених шарів буде залежати від технологічного режиму наплавлення конкретних деталей. Тому перед впровадженням рекомендованих матеріалів необхідно провести комплекс лабораторних досліджень для відпрацювання технологічних процесів виготовлення та відновлення деталей устаткування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Mendez P.F., Barnes N., Bell K., Borle S.D., Gajapathi S.S., Guest S.D., Izadi H., Gol A.K., Wood G. Welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 16, Issue 1, January 2014, Pages 4-25, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.011>
2. Singla Y.K., Maughan M.R., Arora N., Dwivedi D.K. Enhancing the wear resistance of iron-based alloys: A comprehensive review of alloying element effects. *Journal of Manufacturing Processes* Volume 120, 30 June 2024, Pages 135-160. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.04.038>
3. Ding T., Li C., Jing W., Di X., Hu W. Influences of boron on the microstructural characteristics and wear performance of hypereutectic Fe-Cr-C-Mo-xB hardfacing alloy. *Surface and Coatings Technology*. Volume 478, 29 February 2024, 130415. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130415>
4. Ivanov O., Prysyazhnyuk P., Shlapak L., Marynenko S., Bodrova L., Kramar H. Researching of the structure and properties of FCAW hardfacing. based on Fe-Ti-Mo-B-C welded under low current. 1st Virtual International Conference "In service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction" *Procedia Structural Integrity* 36 (2022) 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.028>
5. Naik H., Bhoskar A., Kalyankar V., Deshmukh D. Nickel-based metallurgical coating architectures for superior wear resistance in high-temperature P91 steel applications. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems* Volume 9, March 2025, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2025.100151>
6. Correa E.O., Alcântara N.G., Valeriano L.C., Barbedo N.D., Chaves R.R., The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process. *Surface and Coatings Technology* Volume 276, 25 August 2015, Pages 479-484. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.026>
7. Zhang J., Wei J., Wei S., Huang Z., Xu L., Wei W., Gao Z., Shi Y. Effect of interlayer temperature and extremely low terminal cooling temperature on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing alloy. *Journal of Materials Research and Technology* Volume 23, March–April 2023, Pages 4105-4116. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.012>
8. Wu J.Z., Zhang S.H., Meng X.P., Sun R.H. and oth. Unraveling the high-temperature wear mechanisms of FeCoNiCrMo HEA claddings: the critical role of eutectic microstructure. *Wear*. Volume 593, 15 May 2026, 206652. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2026.206652>
9. Monnet A., Fras T., Kazup A., Bahi S., Rusinek A., Guitton A. Multi-scale characterization of a high chromium-carbon based hardfacing alloy welded by flux-cored arc welding. *Materials Characterization*. Volume 233, March 2026, 116038. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2026.116038>
10. Katsich C., Rojacz H., Hajas B., Kirnbauer A., Varga M., Mayrhofer P.H. Load-dependent mild abrasive wear behavior of Fe-Cr-C-based hardfacings at room and elevated temperatures. *Wear*. Available online 8 April 2026, 206723 In Press, Journal Pre-proof. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2026.206723>

REFERENCES:

1. Mendez, P.F., Barnes, N., Bell, K., Borle, S.D., Gajapathi, S.S., Guest, S.D., Izadi, H., Gol, A.K., Wood, G. (2014) Welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 16, Issue 1, January, Pages 4-25, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.011>
2. Singla, Y.K., Maughan, M.R., Arora, N., Dwivedi, D.K. (2024) Enhancing the wear resistance of iron-based alloys: A comprehensive review of alloying element effects. *Journal of Manufacturing Processes* Volume 120, 30 June, Pages 135-160. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.04.038>
3. Ding, T., Li, C., Jing, W., Di, X., Hu, W. (2024) Influences of boron on the microstructural characteristics and wear performance of hypereutectic Fe-Cr-C-Mo-xB hardfacing alloy. *Surface and Coatings Technology*. Volume 478, 29 February, 130415 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130415>

4. Ivanov, O., Prysyzhnyuk, P., Shlapak, L., Marynenko, S., Bodrova, L., Kramar, H. (2022) Researching of the structure and properties of FCAW hardfacing. based on Fe-Ti-Mo-B-C welded under low current. 1st Virtual International Conference "In service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction" *Procedia Structural Integrity* 36 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.028>
5. Naik, H., Bhoskar, A., Kalyankar, V., Deshmukh, D. (2025) Nickel-based metallurgical coating architectures for superior wear resistance in high-temperature P91 steel applications. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems* Volume 9, March 2025, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2025.100151>
6. Correa, E.O., Alcântara, N.G., Valeriano, L.C., Barbedo, N.D., Chaves, R.R. (2015) The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process. *Surface and Coatings Technology* Volume 276, 25 August, Pages 479-484. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.026>
7. Zhang, J., Wei, J., Wei, S., Huang, Z., Xu, L., Wei, W., Gao, Z., Shi, Y. (2023) Effect of interlayer temperature and extremely low terminal cooling temperature on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing alloy. *Journal of Materials Research and Technology* Volume 23, March–April, Pages 4105-4116. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.012>
8. Wu, J.Z., Zhang, S.H., Meng, X.P., Sun, R.H. and oth. (2026) Unraveling the high-temperature wear mechanisms of FeCoNiCrMo HEA claddings: the critical role of eutectic microstructure. *Wear*. Volume 593, 15 May, 206652. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2026.206652>
9. Monnet, A., Fras, T., Kazup, A., Bahi, S., Rusinek, A., Guitton, A. (2026) Multi-scale characterization of a high chromium-carbon based hardfacing alloy welded by flux-cored arc welding. *Materials Characterization*. Volume 233, March, 116038. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2026.116038>
10. Katsich, C., Rojacz, H., Hajas, B., Kirnbauer, A., Varga, M., Mayrhofer, P.H. (2026) Load-dependent mild abrasive wear behavior of Fe-Cr-C-based hardfacings at room and elevated temperatures. *Wear*. Available online 8 April, 206723 In Press, Journal Pre-proof. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2026.206723>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 04.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026