

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ НАПЛАВЛЕНИХ ПОРОШКОВИМИ ДРОТАМИ СИСТЕМИ Fe-Ti-B-C

Іванов О.О., Присяжнюк П.М.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Луцак Л.Д., ТзОВ МНВЦ «Епсілон ЛТД»

Анотація. Дослідження структури зносостійких поверхневих шарів, отриманих методом наплавлення порошковими дротами системи Fe-Ti-B-C з використанням порошку титану різних серійних марок ПТХ та ПТМ. Визначення мікроструктури проведено методом сканувальної електронної мікроскопії (SEM), виміряна твердість шарів.

Ключові слова: наплавлення, порошкові електроди, карбід титану, диборид титану, зносостійкі покриття.

Вступ

Сьогодні створення нових, сучасних, економічно доцільних, зносостійких матеріалів є актуальним завданням матеріалознавства та багатьох виробничих галузей. Зокрема такими матеріалами є зносостійкі покриття, отримані шляхом наплавлення порошковими електродами. Наплавлення такими електродами є універсальним та надзвичайно перспективним методом підвищення зносостійкості деталей обладнання деревообробної [1] промисловості, промисловості з оброблення ґрунту, переробки пластмасових відходів, виробничої, нафтової, газової та нафтогазової промисловостей [2].

Гнучкість та відносна простота процесу виготовлення порошкових електродів дозволяє в широкому діапазоні регулювати вихідні властивості покриттів шляхом зміни співвідношення вхідних компонентів шихти порошкових дротів.

Аналіз публікацій

Серед переваг отримання зносостійких матеріалів шляхом наплавлення порошковими електродами серед інших методів [3, 4] варто також відмітити економічний показник, оскільки отримання матеріалів таким шляхом не потребує дорогавартісного чи спеціального обладнання. Окрім того, простота методу дозволяє отримувати покриття в практично будь-яких просторових положеннях, різноманітних форм та розмірів і на багатьох поверхнях, що неможливе для лазерного наплавлення [4] та синтезу [3].

Серед найбільш поширених систем, які використовуються як системи порошкових електродів, є системи на основі хрому [5], на основі вольфраму та на основі титану [6].

Серед переваг систем на основі хрому можна виділити високу твердість та стійкість проти корозії, але за рахунок формування скелето-подібної крупнодисперсної структури з низькою тріщиностійкістю та розчинності заліза в карбідах хрому, такі покриття характеризуються низькою стійкістю в умовах високого питомого навантаження. Системи на основі W витриваліші за різних умов абразивного зношування, але електроди систем, що містять W, – це високовартісні електроди, які не завжди економічно доцільно використовувати для відновлення та підвищення зносостійкості деталей обладнання, що працює в певних умовах. Твердість тугоплавких сполук титану з вуглецем та бором вища ніж у сполуках хрому з вуглецем та бором, а розчинність титану в залізі незначна (~ 1 мас. %) [7], тому системи на основі Fe-Ti-C-B з домішками легувальних компонентів можна вважати більш перспективними від систем на основі Fe-Cr-C-B та економічно доцільнішими, ніж системи з вмістом W.

У забезпеченні проходження «*in-situ*» реакції під час горіння дуги відбудеться формування фаз TiB₂ та TiC, які характеризуються високими значеннями твердості: ~ 30 ГПа та ~ 32 ГПа, відповідно.

Для зносостійких покриттів найбільш важливими є такі параметри, як мікроструктура, тип матриці, розподіл карбідів та їхній розмір, форма і твердість [8].

Мета і постановка завдання

У виборі компонентів для виготовлення порошкових електродів постає питання в різниці між використанням порошків різних серійних марок, оскільки вони відрізняються за методом виготовлення та ціною.

Отже, виникає завдання з порівнянням структур поверхневих зносостійких шарів, отриманих наплавленням електродами на основі системи Fe-Ti-B-C, з порошками титану різних серійних марок. Мета – встановити, чи є відмінності у структурах шарів з титаном різних марок, отриманих різними методами.

Особливості формування структури та властивостей наплавлених поверхневих шарів

Основними показниками, що приймаються до уваги у виготовленні порошкових електродів, є хімічна взаємодія компонентів шихти за умови температур, що утворюються в процесі наплавлення та сипучості шихти, для забезпечення рівномірного, необхідного заповнення металевої оболонки (стрічки).

Компоненти в складі шихти повинні бути достатньо перемішані для рівномірного співвідношення по всій довжині порошкового електрода. На сипучість шихти впливають такі параметри, як вологість порошкових компонентів, їхній розмір та форма.

Порошкові електроди виготовлялися на спеціальному стенді (рис. 1).

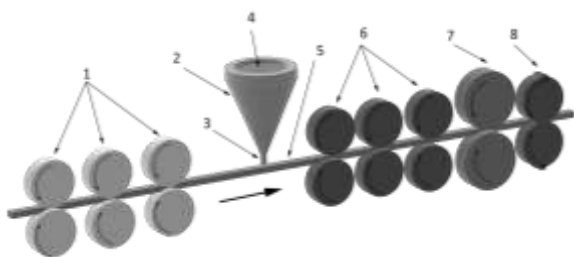


Рис. 1. Схема роботи стенда для виготовлення порошкових електродів: 1 – деформуючі ролики; 2 – бункер із шихтою; 3 – регулятор подачі шихти у стрічку; 4 – шихта; 5 – металева стрічка; 6 – ролики для закриття стрічки; 7 – ведучі ролики; 8 – відрізний ролик

В експерименті використовувалися популярні серійні порошки титану марки ППХ-5-1 ТУ 48-10-78-83 та марки ППМ-1 ТУ 14-22-57-92, технічна інформація інших компонентів системи вказана в табл. 1.

Відповідно до ТУ 48-10-78-83 «Порошок титановий хімічний» порошок титановий хімічний (ППХ), який виготовляється за цим стандартом, отримують із губчастого Ті за допомогою застосування механохімічного, термохімічного (металотермічного) та плазмохімічного методів.

Таблиця 1 – Компоненти шихти

Компонент	Виробник	Марка	Розмір частинки, мкм
Титан	Закарпатський дослідний металургійний завод	ППХ-5-1	180-450
Титан	ТД Метал Інвест	ППМ-1	~ 200
Карбід бору	Донецький завод хімічних реактивів		20...40

Після розмелювання губчастого титану проводять додаткове гідрування (насичення воднем) вихідної шихти з подальшим дегідруванням. Після гідрування отриманий гідрид розмелюють до необхідної дисперсності, після чого проводять термовакуумне дегідрування в температурному режимі 710–810 °С. Під час процесу дегідрування відбувається спікання зерен Ті. Для отримання готової продукції спечену масу розмелюють до необхідних розмірів. Контроль гранулометричного складу здійснюється шляхом просіювання розмеленого порошку через сита, отвори яких мають відповідні розміри. Частинки такого порошку (ППХ) характеризуються формою, близькою до осколків.

Відповідно до ТУ 14-22-57-92 «Порошок титановий» титановий порошок отримують шляхом відновлення двоокису титану (TiO₂) – мінеральної сировини високої якості – гідридом кальцію (CaH₂), який не утворює твердих розчинів та інших хімічних сполук із відновлюваними металами, у гідрид титану (TiH₂) та його розкладом на Н та Ті (дегідрувані).

Порошки Ті, які отримуються таким методом, мають іррегулярну (неправильну) форму зерен та розвитку поверхневу структуру.

Хімічний склад взірців розраховувався відповідно до хімічного рівняння (1), яке забезпечує формування карбідів та диборидів титану.



Хімічний склад шихти взірців наведений у табл. 2.

Таблиця 2 – Хімічний склад шихти

Зразок №	ат. %			мас. %	
	Ti	B	C	Ti	B4C
1(ППХ)	37,5	50	12,5	72,214	27,786
2 (ППМ)	37,5	50	12,5	72,214	27,786

Під час дослідів використовувався порошок B_4C замість порошоків бору та вуглецю, оскільки порошки вуглецю у вигляді технічної сажі та бору занадто дрібні та в складі шихти сприяють поганій липчості та нерівномірному заповненню металеві стрічки. Також варто зазначити, що надто дрібні порошки мають здатність до більш активної взаємодії, і тому в процесі проходження екзотермічної реакції можливе передчасне вигорання технічної сажі, що унеможливить здійснення необхідних фазових перетворень.

Перед виготовленням електродів порошки титану марок ППМ та ППХ додатково гранулювали шляхом перетирання через сито з розміром отворів 200 мкм для запобігання потраплянню великих частинок у шихту.

Усі порошки піддавалися сушінню в сушильній шафі СНОЛ за температури $120^{\circ}C$ протягом 1,2 год.

Змішування порошкових компонентів шихти здійснювалося в гравітаційному змішувачі протягом 30 хв для запобігання нерівномірному розподілу порошкових компонентів у шихті.

Матеріал металеві стрічки для виготовлення електродів – низьковуглецева сталь 08 кп ГОСТ 503-81. Матеріал основи для наплавлення СтЗсп ГОСТ 535-2005.

Коефіцієнт заповнення стрічки визначався шляхом зважування порожньої металеві оболонки та виготовлених електродів і становив приблизно 25 %.

Наплавлення здійснювалося з дотриманням параметрів: пряма полярність, струм 160–180 А, напруга 30–32 В. Охолодження проводилося за температури $20^{\circ}C$.

Твердість вимірювалася методом Роквелла за шкалою А. Мікροструктуру наплавлених шарів досліджували методом сканувальної електронної мікроскопії на мікроскопі ZeiSS EVO 40 XVP.

Структура експериментального зразка № 1 зображена на рис. 2, зразка № 2 – на рис. 3.

Структура отриманих матеріалів суттєво відрізняється. Експериментальний зразок № 1 характеризується відсутністю чітко виражених фаз, за винятком окремих темних включень, які відповідають TiC , у той час як кристали TiB_2 відсутні. Оскільки бор менш дифузійний рухливий, ніж вуглець, така структура свідчить про те, що під час формування поверхні в процесі наплавлення певні чинники призводять до гальмування дифузійних процесів, у разі яких встигає утворю-

ватися TiC , але не встигає TiB_2 . Така структура свідчить про відсутність процесу утворення та виділення фаз карбіду та дибориду титану під час наплавлення. Твердість зразка – 80,5 HRA.

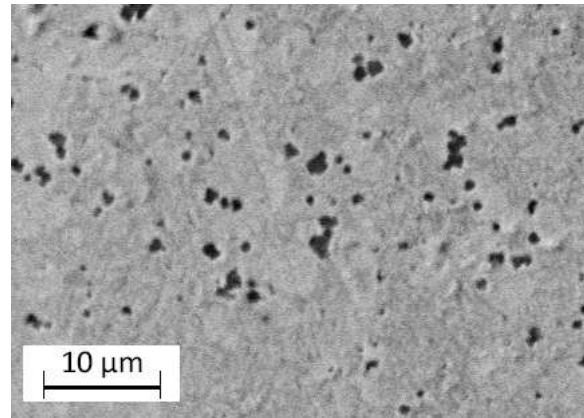


Рис. 2. Мікροструктура наплавленого шару зразка № 1

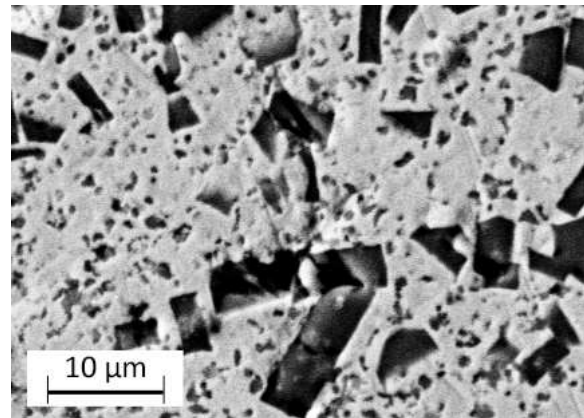


Рис. 3. Мікροструктура наплавленого шару зразка № 2

У зразка № 2 спостерігається інша структура з чітко вираженими фазами, які відрізняються за формою, розмірами та кольором. Темні кристали форми гексагональних призм відповідають дибориду титану, сірі включення – карбід титану та світла фаза, у якій розміщені кристали дибориду титану й карбіду титану відповідає фериту. Така структура свідчить про проходження реакції «*in-situ*» під час наплавлення, що забезпечує формування дрібнозернистої, рівномірно розподіленої структури, яка характеризується високою твердістю та стійкістю до абразивного зношення. Твердість зразка № 2 – 84,5 HRA.

Можна припустити, що різниця у формі частинок та методів отримання порошоків Ti є ключовими факторами, які впливають на

процеси фазових перетворень. Імовірно, що у випадку зразка № 1 факторами, які гальмують дифузійні процеси, є форма частинок порошку Ti (ПГХ), яка має менш розвинену площу поверхні, ніж у використанні порошку Ti (ППМ), та ймовірне окислення частинок Ti (ПГХ), зумовлене процесом виробництва, що можливе під час дегідрування порошку титану. Наявність оксидних плівок та менш розвинена площа поверхні частинок є факторами, що перешкоджають (гальмують) повному процесу утворення TiC та TiB₂ у наплавленому покритті. Відсутність великої кількості TiC та повна відсутність TiB₂ є причиною твердості зразка № 1, яка суттєво поступається твердості зразка № 2, у мікроструктурі якого спостерігається значна кількість карбідів та диборидів титану.

Висновки

Використання титану різних серійних марок у складі системи Fe-Ti-B-C порошкових електродів призводить до формування різних мікроструктур отриманих шарів, відповідно до різних фізико-механічних властивостей.

Використання титану марки ПГХ перешкоджає проходженню «*in-situ*» синтезу та призводить до формування однорідної структури з низькою твердістю 80,5 HRA.

Використання дороговартісного титану марки ППМ забезпечує проходження «*in-situ*» реакції й утворення твердих фаз TiB₂ та TiC, що забезпечує формування дрібнозернистої структури з рівномірно розподіленими твердими включеннями. Така структура характеризується високим значенням твердості 84,5 HRA.

Подальші дослідження варто спрямувати на добавляння до шихти легувального компонента, який не тільки забезпечить проходження реакції з економічно доцільнішим титаном марки ПГХ, але й позитивно вплине на фізико-механічні характеристики отриманого покриття.

Література

1. Ivanov O. O., Prysyzhnyuk P. M., Lutsak D. L., Burda M. J., Lutsak L. D. Restoration of equipment for woodworking. *Problems of Tribology*. 2018. 87(1). P. 99–105.
2. Ivanov O., Prysyzhnyuk P., Lutsak D., Matviienkiv O., Aulin V. Improvement of Abrasion Resistance of Production Equipment Wear Parts by Hardfacing with Flux-cored Wires Containing Boron Carbide/Metal Powder Reaction Mixtures. *Management Systems in Production Engineering*. 2020. 28(3). P. 178–183.

3. Namini A.S., Asl M. S., Delbari S.A. Influence of Sintering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Ti–Mo–B4C Composites. *Metals and Materials International*. 2019.
4. Zhang M., Luo S. X., Liu S. S., Wang X. H., Effect of Molybdenum on the Wear Properties of (Ti,Mo)C-TiB₂-Mo₂B Particles Reinforced Fe-Based Laser Cladding Composite Coatings. *Journal of Tribology*. 2018. 140(5).
5. Похмурська Г. В., Войтович А. А. Ударно-абразивне зношування поверхневих шарів, наплавлених порошковими дротами системи Fe-Cr-B-C. *Науковий вісник ННТУ України*. 2015. 25(3). С. 129–135.
6. Луцак Д. Л., Присяжнюк П. М., Карпаш М. О., Пилипів В. М., Коцюбинський В. О. Формирование структуры и свойства композиционных покрытий TiB₂-TiC-сталь, полученных совмещением электродуговой наплавки и СВС. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2016. 38. С. 1265–1278.
7. Борисова А. Л. Совместимость тугоплавких соединений с металлами и графитом: справочник. Киев: Наук. думка, 1985. 247 с.
8. Wang Yu Xi, Zhang S. Toward hard yet tough ceramic coatings. *Surface & Coatings Technology*. 2014. 258. P. 1–16.

References

1. Ivanov O. O., Prysyzhnyuk P. M., Lutsak D. L., Burda M. J., Lutsak L. D. (2018). Restoration of equipment for woodworking. *Problems of Tribology*, 87(1), 99–105.
2. Ivanov O., Prysyzhnyuk P., Lutsak D., Matviienkiv O., Aulin V. (2020). Improvement of Abrasion Resistance of Production Equipment Wear Parts by Hardfacing with Flux-cored Wires Containing Boron Carbide/Metal Powder Reaction Mixtures. *Management Systems in Production Engineering*, 28(3), 178–183.
3. Namini A. S., Asl M. S., Delbari S. A. (2019). Influence of Sintering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Ti–Mo–B4C Composites. *Metals and Materials International*.
4. Zhang M., Luo S. X., Liu S. S., Wang X. H. (2018). Effect of Molybdenum on the Wear Properties of (Ti,Mo)C-TiB₂-Mo₂B Particles Reinforced Fe-Based Laser Cladding Composite Coatings. *Journal of Tribology*, 140(5).
5. Pohmurs'ka G. V., Vojtovich A. A. (2015). Udarно-abrazivne znoshuvannya poverhnevih shariv, naplavlenih poroshkovimi drotami sistemi Fe-Cr-B-C. *Scientific Bulletin of UNFU*, 25(3), 129–135. [in Ukrainian].
6. Lucak D. L., Prisyazhnyuk P. M., Karpash M. O., Pilipiv V.M., Kocyubinskij V.O. (2016). Formirovanie struktury i svojstva kompozicionnyh pokrytij TiB₂-TiC-stal', poluchennyh sovmeshcheniem elektrodugovoj naplavki i SVS. *Metallphysics and Advanced Technologies*, 38, 1265–1278. [in Russian].

7. Borisova A. L. Sovmestimost' tugoplavkih soedinenij s metallami i grafitom: Sprav. Kyiv: Nauk dumka, 1985. 247 c. [in Russian].
8. Wang Yu Xi, Zhang S. (2014). Toward hard yet tough ceramic coatings. *Surface & Coatings Technology*, 258, 1-16.

Іванов Олександр Олександрович, аспірант, кафедра зварювання, тел. +38 0951365117, e-mail: ztk@nung.edu.ua

Присяжнюк Павло Миколайович, к.т.н., доцент кафедри зварювання, тел. (0342) 50-66-12, e-mail: pavlo1752010@nung.edu.ua.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 15, вул. Карпатська, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна.

Луцак Любомир Дмитрович, к.т.н., директор з виробництва, ТЗОВ МНВЦ «Епсілон ЛПД», вул. Макухи, 2, Івано-Франківськ, 76014, Україна.

Features of formation of the structure and properties of surface layers reinforced with flux-cored wires based on the Fe-Ti-B-C system

Abstract. In this work it was established that the structure of surfacing materials based on the Fe-Ti-B-C system depends on the brand of powders that were used for production of flux-cored electrodes. Two experimental electrodes of Fe-Ti-B-C were studied using two different brands of Ti powders. The brands were PHT and PTM, that are obtained by various methods. Microstructure of the coating with PHT Ti are characterized with the structure without hard TiB_2 and TiC phases, which is a proof of the absence of "in-situ" synthesis reaction during FCAW surfacing. Such structure is also characterized by low hardness. Microstructure of the coating with PTM Ti consist of uniformly distributed hard phases in metal matrix, which is a proof of "in-situ" synthesis reaction during FCAW surfacing. The hardness of such structure is higher than the hardness of the previous example. The experiment shows that using powders of different brands can significantly affect the structure and physical and mechanical properties of the surfacing.

Key words: flux-cored wire, FCAW, TiC , TiB_2 , surfacing.

Ivanov Olexandr, graduate student, Welding Department, тел. +38 0951365117, e-mail: ztk@nung.edu.ua

Prisyazhnyuk Pavlo, associate professor, PhD in Engineering, Welding Department, tel. +38 034-250-66-12, pavlo1752010@nung.edu.ua, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Karpatska str., 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine.

Lutsak Lubonir, PhD in Engineering, Production Director, MNVC «Epsilon LTD», Makukhi str., 2, Ivano-Frankivsk, 76014, Ukraine.

Особенности формирования структуры и свойств поверхностных слоев наплавки порошковой проволокой системы Fe-Ti-B-C

Аннотация. Исследование структуры износостойких поверхностных слоев, полученных методом наплавки порошковыми проволоками системы Fe-Ti-B-C с использованием порошка титана различных серийных марок ППХ и ППМ. Определение микроструктуры проведено методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), измерена твердость слоев.

Ключевые слова: наплавка, порошковые электроды, карбид титана, диборид титана, износостойкие покрытия.

Іванов Олександр Олександрович, аспірант, кафедра сварки, тел. +38 0951365117, e-mail: ztk@nung.edu.ua

Присяжнюк Павел Николаевич, к.т.н., доцент кафедри сварки, тел. (0342) 50-66-12, e-mail: pavlo1752010@nung.edu.ua,

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, г. Івано-Франківськ, 76019, Україна.

Луцак Любомир Дмитрович, к.т.н., директор по производству, ООО МНПЦ «Эпсилон ЛПД», ул. Макухи, 2, г. Івано-Франківськ, 76014, Україна.