

УДК 621.74.01

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).98-103](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).98-103)

П.М. Присяжнюк, доц., канд. техн. наук, **І.М. Семяник**, асп., **Л.Д. Луцак**, доц., канд. техн. наук, **Л.Л. Трошук**, асп.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м.Івано-Франківськ, Україна

e-mail: admin@nung.edu.ua

Вибір системи легування порошкових електродних матеріалів для зміцнення робочих поверхонь обладнання з переробки деревної біомаси

З метою забезпечення довговічності робочих поверхонь обладнання для виготовлення паливних брикетів із відходів деревообробної промисловості шляхом використання методів обчислювальної термодинаміки було запропоновано систему легування порошкових електродних матеріалів для нанесення електродугових покриттів Fe-Mn15-Cr15-Ti2-C2. Отримані покриття характеризуються твердістю на рівні 52 HRC, абразивною та корозійною стійкістю, а також здатністю до деформаційного зміцнення.

електродугове наплавлення, порошкові дроти, високохромистий сплав, карбід титану, деформаційне зміцнення

П.Н. Присяжнюк, доц., канд. техн. наук, **І.М. Семяник**, асп., **Л.Д. Луцак**, доц., канд. техн. наук, **Л.Л. Трошук**, асп.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м.Івано-Франківськ, Україна

Выбор системы легирования порошковых электродных материалов для укрепления рабочих поверхностей оборудования по переработке древесной биомассы

С целью обеспечения долговечности рабочих поверхностей оборудования для изготовления топливных брикетов из отходов деревообрабатывающей промышленности путем использования методов вычислительной термодинамики было предложено систему легирования порошковых электродных материалов для нанесения электродуговых покрытий Fe-Mn15-Cr15-Ti2-C2. Полученные покрытия характеризуются твердостью на уровне 52 HRC, абразивной и коррозионной стойкостью, а также способностью к деформационного упрочнения.

електродугова наплавка, порошкові проволочки, високохромистий сплав, карбид титана, деформаційне упрочнення

Постановка проблеми. Проблема підвищення довговічності обладнання із переробки деревної біомаси у паливні брикети набуває з кожним роком все більшої актуальності, як у Карпатському регіоні так і в Україні в цілому через необхідність посилення енергетичної безпеки держави за рахунок відновлюваної енергетики. В умовах переробки тирси на паливні брикети основними елементами, які визначають довговічність та працездатність брикетувального обладнання є деталі, які безпосередньо контактують із робочим середовищем. Це, насамперед шнеки, матриці та пуансони. З огляду на властивості робочого середовища поверхневий шар таких деталей повинен характеризуватись одночасно високою твердістю, корозійною стійкістю та стійкістю при високих циклічних питомих навантаженнях. Як показує

досвід такий комплекс властивостей може бути отриманий при використанні матеріалів на основі реліту та вуглецевої або корозійностійкої сталі. Однак, дефіцитність вольфрамової сировини та її постійно зростаюча вартість приводять до необхідності пошуку нових альтернативних систем легування та матеріалів на їх основі. До такої системи, зокрема відноситься система Fe-Cr-Mn-Ti-C у якій Mn марганець забезпечує необхідну стійкість при високих питомих навантаженнях, Cr – корозійну стійкість та твердість, а Ti – циклічну стійкість за рахунок модифікування структури. Таким чином, проблема створення нових покриттів на першому етапі зводиться до правильного вибору співвідношення компонентів на основі аналізу фазового складу, структури та властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш поширеними бевольфрамовимим матеріалами для наплавлення у даний час залишаються високохромисті сплави заевтектичного або еквтектичного типу. Підвищення рівня їх властивостей проводиться шляхом легування сильними карбідоутворюючими елементами з метою модифікування структури. Автори роботи [1] з метою підвищення зносостійкості високохромистих сплавів для наплавлення проводили легування ніобієм. Результати досліджень показали, що при додаванні 7 % Nb до сплавів системи Fe-Cr24-C5 їх зносостійкість при терті по закріпленому абразиву зростає на 20 %, при цьому твердість поверхневого шару ~ 8 ГПа після легування практично не змінюється. За результатами мікроскопічних досліджень поверхневих шарів та зношених поверхонь таке підвищення зносостійкості пояснюється суттєвим подрібненням структури первинних карбідів хрому Cr_7C_3 . Подібні результати були отримані у роботі [2] при легуванні високохромистих матеріалів для наплавлення системи Fe-Cr30-C5,5 ніобієм та диборидом титану у кількості 4,5 та 1 мас. %, відповідно. Після проведення легування твердість наплавленого шару залишається практично незмінною – на рівні 59 HRC, а зносостійкість за умов тертя по закріпленому абразиву зростає в 1,97 рази. Таке підвищення зносостійкості пояснюється наявністю в центральних областях зерен Cr_7C_3 включень складного карбіду $(Ti,Nb)C$, який виділяється на початкових стадіях кристалізації та виконує роль модифікатора. У роботі [4] вивчали вплив легування на твердість та ударну зносостійкість електродугових покриттів на основі системи Fe-Mn-C. Результати показали, що перехід від системи легування Fe-Mn-C до системи Fe-Mn-W-C (вміст W – 19 мас. %) твердість покриттів зростає від 11 HRC до 36 HRC. Покриття складаються із аустеніту та карбідів (цементитного типу, вольфраму та типу M_6C). Після добавки до сплавів системи Fe-Mn-W-C ~ 4 мас. % Mo твердість збільшується до 44 HRC при цьому появи нових фаз на дифрактограмі не було виявлено. Практично ідентичний характер зміни властивостей проявляється при додаванні Cr. Sachin Pawara та ін. провели дослідження впливу легування покриттів системи Fe-Cr-C у наступних комбінаціях елементів: Mo-Ti, Mo-W та Mo-Nb-W-V-Ti [5]. Результатами визначення зносостійкості було встановлено, що найвищою зносостійкістю характеризується сплав, який містить одночасно усі п'ять легуючих елементів, оскільки вони утворюють тугоплавку багатоконпонентну фазу, яка модифікує структуру. Таким чином, легування карбідоутворюючими елементами є ефективним як для системи Fe-Cr-C так і для Fe-Mn-C.

Постановка завдання. Метою роботи було отримання корозійно-зносо- та ударостійкого матеріалу для нанесення покриттів системи Fe-Cr-Mn-Ti-C із модифікованою аустеніто-карбідною структурою на основі термодинамічного аналізу

характеру формування фаз при охолодженні та експериментальному дослідженні структури та властивостей електродугових покриттів із порошкових електродних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Моделювання фазового складу покриттів здійснювали із використанням програмного забезпечення, JmatPro 6.1 та Thermocalc які побудовані на розрахунку вільної енергії за методикою Calphad. Як вихідну систему для розрахунків було вибрано Fe-Cr15-Mn15-C2-Ti. Зразки для експериментальних досліджень виготовляли шляхом ручного електродугового наплавлення покриттів із використанням порошкових електродів на підкладки виготовлені із сталі Ст. 3. Виготовлення порошкових електродів проводили шляхом закатування у порошкову стрічку із сталі марки 08кп сумішей порошоків металевго хрому ПХА 99 ГОСТ 14-00186482-051-2005, марганцю Mn997 ГОСТ 6008-90, титану ПТС-1 ТУ 14-22-57-92 та графіту К-354 ГОСТ 7885-86. Система легування розраховувалась із урахуванням коефіцієнту заповнення порошкового електроду. Хімічний склад електродних матеріалів наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Елементний склад порошкових електродів, мас. %.

Зразок №	Cr	Mn	C	Ti
1	15	15	2	-
2	15	15	2	2

Джерело: розроблено авторами

Дослідження структури проводили методом електронної мікроскопії у режимі обернено відбитих електронів (CZ BSD), який дозволяє розрізняти фази за їх їх густиною. При дослідженнях використовували електронний мікроскоп CarlZeiss, який включає у себе базовий блок EVO 40XVP. Вимірювання мікротвердості виконані на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженнях на індентор 1 і 2 Н, значення мікротвердості розраховувалось за результатами трьох вимірювань. Розміри відбитків вимірювались за допомогою цифрової камери-окуляра DCM510 приєднаної до твердоміра. Твердість за методом Роквелла вимірювали на твердомірі ТК-2 (ГОСТ 3882-74) втискуванням алмазного конуса при навантаженні ~ 1500 Н (шкала С). Поверхневу пластичну деформацію (ППД) проводили за допомогою твердоміра Брінеля. При навантаженні 3000кг. Як індентор використовувалась твердосплавна кулька діаметром 10мм. Після (ППД) твердість вимірювалась методом Роквелла у центрі отриманих лунок. Твердість визначали як середньоарифметичне значення не менше як по 5 вимірювань.

Оцінка абразивної зносостійкості нанесених покриттів проводилась в умовах тертя по закріпленому абразиву. Як контртіло (абразив) використовувався абразивний круг із карбїду кремнію діаметром 300 мм та товщиною 40 мм. Швидкість ковзання становила 0,21 м/с, шлях тертя становив 33 м. Випробовування проводилось на зразках циліндричної форми діаметром 10 мм.

Аналіз побудованого політермічного січення (FeMnCrC) – Ti (рис. 1) показує, що основними стабільними фазами у даній системі є : TiC із ГЦК граткою, аустеніт (А), ферит (Ф) та нижчий карбїд хрому Cr₇C₃. Відповідно до діаграми стану добавки Ti суттєво впливають на температуру солїдуса системи (при вмісті 1 мас. % температура зростає на 400 К), тому значна кількість Ti буде суттєво ускладнювати технологічні характеристики матеріалів для наплавлення. Кристалізація сплаву із вмістом 2 мас. % Ti починається із виділення TiC за температури вище ніж 1800 К, далі при температурі ~ 1550 К починається кристалізація аустеніту у температурному інтервалі 1550 – 1450 К. Таким чином, виділені зерна TiC будуть слугувати центрами для кристалізації

аустенітної фази, подрібнюючи її структуру. При температурі 1450 К починається кристалізація евтектики $A+Cr_7C_3$, яка завершується у вузькому температурному інтервалі. При цьому, підвищення вмісту Ті у розглянутому температурному інтервалі не впливає на температуру початку евтектичного перетворення. Після завершення кристалізації структура сплаву представлена трьома фазами: аустенітом, TiC та карбідом Cr_7C_3 .

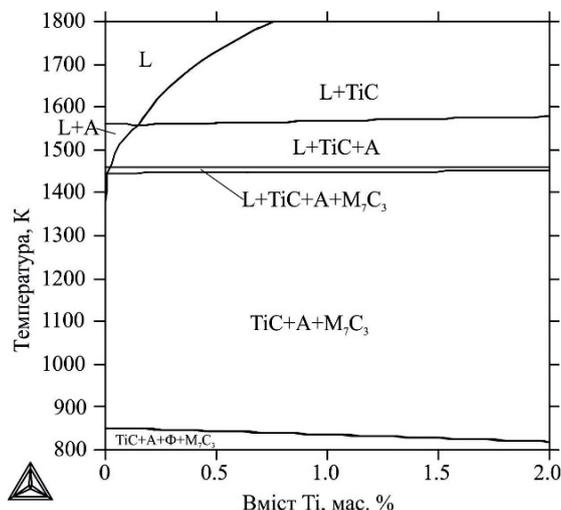


Рисунок 1 – Політермічне січення системи Fe-Cr-Mn-Ti-C по лінії Cr=Mn=15, C=2 мас. %
Джерело: розроблено авторами

Результати дослідження мікроструктури поверхневого шару, наплавленого порошковим електродним матеріалом системи Fe-Mn15-Cr15-Ti2-C2 (рис. 2) показують, що він складається із трьох структурних складових: витягнутих дендритних кристалів марганцевого аустеніту, що ростуть у напрямку протилежному відводу тепла, дисперсних обмежених зерен TiC , які знаходяться в центральних областях аустенітних зерен та пластинчастої евтектики $A+Cr_7C_3$, розташованої у міждендритному просторі.

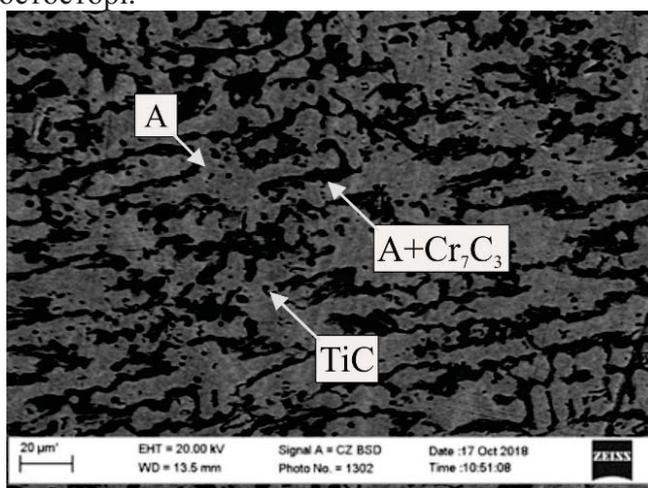


Рисунок 2 – Структура електродугового покриття системи Fe-Mn15-Cr15-Ti2-C2
Джерело: розроблено авторами

За результатами визначення твердості та зносостійкості (табл. 2) видно, що вплив Ті на твердість покриттів є незначним як до пластичної деформації так і після неї та проявляється головним чином у підвищенні мікротвердості аустеніту за рахунок

потрапляння дисперсних зерен TiC у зону інденування. Вплив вмісту Ti на абразивну зносостійкість є більш суттєвим, оскільки спостерігається її підвищення на 30 %. Ймовірно підвищення абразивної зносостійкості у даному випадку зумовлене подрібненням зерен аустеніту та евтектики через модифікуючу дію добавок TiC.

Таблиця 2 – Властивості поверхневих шарів, наплавлених електродами системи Fe-Cr-Mn-Ti-C

Зразок №	Твердість до наклепу, HRC	Твердість після наклепу, HRC	Мікротвердість аустеніту, ГПа	Відносна зносостійкість, ε
1	42	52	320	1,0
2	44	52	380	1,31

Джерело: розроблено авторами

Висновки. На основі проведених досліджень встановлено, що у системі Fe-Mn15-Cr15-C2 добавки Ti у кількості до 2 мас. % виконують роль модифікаторів структури, що сприяє суттєвому підвищенню абразивної зносостійкості. Електродугові покриття із порошкових дротів запропонованої системи легування характеризуються корозійною стійкістю та здатністю до наклепу (твердість після пластичної деформації становить 52 HRC), тому можуть бути застосовані для зміцнення робочих поверхонь деталей брикетувальних пресів з виготовлення паливних брикетів із відходів деревообробної промисловості. У подальших дослідженнях слід приділити увагу вибору раціональних технологічних параметрів отримання покриттів розробленої системи легування та особливостям їх механічної обробки.

Список літератури

1. The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process. / Correa, E. O. et al. *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 276. P. 479-484. DOI:10.1016/j.surfcoat.2015.06.026
2. Microstructure and properties of Fe-Cr-C hardfacing alloys reinforced with TiC-NbC. / Liu H. Y. et al. *Journal of iron and steel research international*. 2015. Vol. 23(3). P. 276-280. DOI:10.1016/S1006-706X(16)30045-0
3. Effect of nitrogen alloying on the microstructure and abrasive impact wear resistance of Fe-Cr-C-Ti-Nb hardfacing alloy. / Wang J. et al. *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 309. P. 1072-1080. DOI:10.1016/j.surfcoat.2016.10.029
4. Modeling of Microstructures and Analysis of Abrasive Wear of Arc-Welded Hadfield Steel. / Jankauskas V. et al. *Journal of Friction and Wear*. 2017. Vol. 39(1). P. 78-84. DOI: 10.3103/S1068366618010142
5. Effect of different carbides on the wear resistance of Fe-based hardfacing alloys. / Pawar S. et al. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019. Vol. 78. P. 288-295. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2018.10.014

References

1. 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*, 276, 479-484 [in English].
2. Liu, H. Y., Song, Z. L., Cao, Q., Chen, S. P., & Meng, Q. S. (2016). Microstructure and properties of Fe-Cr-C hardfacing alloys reinforced with TiC-NbC. *Journal of iron and steel research international*, 23(3), 276-280 [in English].
3. Wang, J., Liu, T., Zhou, Y., Xing, X., Liu, S., Yang, Y., & Yang, Q. (2017). Effect of nitrogen alloying on the microstructure and abrasive impact wear resistance of Fe-Cr-C-Ti-Nb hardfacing alloy. *Surface and Coatings Technology*, 309, 1072-1080 [in English].

4. Jankauskas, V., Choteborsky, R., Antonov, M., & Katinas, E. (2018). Modeling of Microstructures and Analysis of Abrasive Wear of Arc-Welded Hadfield Steel. *Journal of Friction and Wear*, 39(1), 78-84 [in English].
5. Pawar, S., Jha, A. K., & Mukhopadhyay, G. (2019). Effect of different carbides on the wear resistance of Fe-based hardfacing alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 78, 288-295 [in English].

Pavlo Prisyazhnyuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Iryna Semyanyk**, post-graduate, **Dmytro Lutsak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Lyubomyr Troshchuk**, post-graduate
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

The Choice of Alloying System of Powder Electrode Materials for Strengthening the Working Surfaces of Wood Biomass Processing Equipment

The aim of the work was to obtain corrosion-resistant and impact-resistant material for hardfacings the system Fe-Cr-Mn-Ti-C based with modified austenite-carbide structure through thermodynamic analysis of the nature of phase formation during cooling and solidification and experimental studies of the microstructure, hardness, abrasive wear resistance, ability to deformation hardening of electric arc hardfacings from powder electrodes materials.

According to the results of the study of the polythermal cross section of the Fe-Mn-Cr-Ti-C system in the concentration range corresponding to the composition of the powder electrode materials, it was found that Ti doping leads to the formation of insoluble TiC in melt in the early stages of crystallization. Its presence provides grain refining of the structure of austenite and austenite-carbide eutectic. The results of the study of the microstructure of the surface layer deposited by a powder electrode material of the Fe-Mn15-Cr15-Ti2-C2 system show that it consists of three structural components: elongated dendritic crystals of manganese austenite growing in the opposite direction to the heat gradient, dispersed TiC inclusions which are located in the central regions of the austenitic grains and the plate eutectic A + Cr₇C₃ located in the interdendritic space. The results of the determination of hardness and durability show that the effect of Ti on the hardness of coatings is negligible both before and after plastic deformation and is manifested mainly in increasing the microhardness of austenite. The effect of Ti content on abrasion resistance is more significant as it is observed to increase by 30%.

Based on the studies, it was found that in the system Fe-Mn15-Cr15-C2 additives Ti in an amount up to 2 wt. % act as structure modifiers, contributing to a significant increase in abrasion resistance. Powder coated electric arc coatings of the proposed alloying system are characterized by corrosion resistance and deformation hardening (hardness after plastic deformation is 52 HRC), so they can be used to strengthen the work surfaces of briquetting presses for the production of fuel briquettes from waste products. Further research should pay attention to the choice of rational technological parameters of obtaining coatings of the developed alloying system and the features of their mechanical processing.

hardfacing, powder wires, high-alloy chromium, titanium carbide, deformation hardening

Одержано (Received) 02.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 16.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019