МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ТЕРМІЧНА ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.74.01 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).91-97

П.М. Присяжнюк, доц., канд. техн. наук, **Р.В. Андрусишин,** асп., **Л.Д. Луцак,** доц., канд. техн. наук, **О.О. Іванов,** асп.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м.Івано-Франківськ, Україна
e-mail: admin@nung.edu.ua

Формування фазового складу, структури та властивості електродугових покриттів системи Fe-Mn-Nb-Si-C для зміцнення робочих поверхонь землерийної техніки

Для порошкових електродних матеріалів із позиції рівноважної термодинаміки розглянуто систему легування Fe-Mn-Nb-Si-C. Розраховано рівноважний фазовий склад систем характерний для матеріалів, що відповідають високомарганцевим електродам легованим карбідом ніобію. Показано, що у процесі кристалізації металу, наплавленого такими електродними матеріалами рівноважною є аустенітокарбідна структура. Експериментальні дослідження структури наплавлених підтверджують результати розрахунків. Запропонована система легування дозволяє отримати твердість поверхневого шару на рівні 35 HRC після наплавлення та 54 HRC після пластичної деформації.
електродугове наплавлення, порошкові дроти, високомарганцева сталь, карбід ніобію, наклеп

П.Н. Присяжнюк, доц., канд. техн. наук, **Р.В. Андрусышин,** асп., **Л.Д. Луцак,** доц., канд. техн. наук, **А.А. Иванов,** асп.
Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г.Ивано-Франковск, Украина

Формирование фазового состава, структуры и свойства электродуговых покрытий системы Fe-Mn-Nb-Si-C для укрепления рабочих поверхностей землеройной техники

Для порошковых электродных материалов с позиции равновесной термодинамики рассмотрена система легирования Fe-Mn-Nb-Si-C. Рассчитан равновесный фазовый состав систем, который характерен для материалов, которые соответствуют высокомарганцевым электродам легированным карбидом ниобия. Показано, что в процессе кристаллизации металла, наплавленного такими электродными материалами равновесной является аустенито-карбидная структура. Экспериментальные исследования структуры наплавленных подтверждают результаты расчетов. Предложенная система легирования позволяет получить твердость поверхностного слоя на уровне 35 HRC после наплавки и 54 HRC после пластической деформации.
электродуговая наплавка, порошковые проволоки, высокомарганцевая сталь, карбид ниобия, наклеп

Постановка проблеми. Специфіка роботи землерийної техніки робочих елементів землерийної техніки передбачає поєднання високої стійкості поверхневого матеріалу за умов ударних навантажень та абразивної зносостійкості. Як правило, таке поєднання властивостей викликає ряд труднощей, оскільки наявність високої концентрації масивних карбідних та (або) боридних фаз у поверхневому шарі поряд із

© П.М. Присяжнюк, Р.В. Андрусишин, Л.Д. Луцак, О.О. Іванов, 2019

забезпеченням високої зносостійкіскості при стиранні по абразиву є причиною крихкого руйнування поверхневого шару. З іншого боку використання марганцевих сталей із високою зносостійкістю при динамічних навантаженнях не дозволяє забезпечити високий рівень стійкості в умовах абразивного зношування за тертя ковзання. Отже, для забезпечення необхідного рівня експлуатаційних показників робочих поверхонь землерийної техніки необхідною є пошук системи легування поверхневого шару, яка буде забезпечувати одночасно формування структурних складових, що забезпечують ударну та абразивну стійкість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З метою вибору найбільш раціональної системи легування електродних матеріалів для зміцнення зубів екскаватора авторами [1] було комбіноване багатошарове наплавлення матеріалами системи Fe-C3.6-Cr32 (марка ABRADUR 58) та Fe-C0.12-Mn7-Cr19-Ni9 (марка INOX B 18/8/6) із заевтектичною аустенітно-карбідною та аустенітною структурою, відповідно. Результати проведених триботехнічних та промислових випробовувань показали що така комбінація елементів дозволяє досягти підвищення зносостійкості за умов ударно-абразивного зношуванняПрисяя практично у 3 рази за рахунок поєднання у структурі пластичного нікельмарганцевого аустеніту та карбідів хрому. Для зміцнення робочих поверхонь грунтообробних машин у роботі [2] пропонується проводити модифікування структури поверхневого шару сталевих деталей шляхом електродугового навуглецювання поверхні із використанням обмідненого вугільного електроду. Така обробка дозволила отримати у структурі поверхневого шару відбілений чавун та досягти рівень твердості ~ 60 HRC. З метою підвищення зносостійкості зубів екскаваторів, виготовлених із середньовуглецевої низьколегованої сталі за умов роботи у середовищі базальту було застосовано електродугове наплавлення електродними матеріалами системи Fe-C1.75-Cr25-Mn1.23 (марка SURODUR) [3]. Після наплавлення проводили відпускання наплавленого шару в діапазоні температур 400 – 600 °С, яке дозволило отримати структуру поверхневого шару, що складалась із дрібнодисперсного мартенситу та зернистих ферито-цементитних сумішей із твердістю ~ 52 HRC. Підвищення довговічності завдяки використанню наплавлення склало 30 %. Використання лазерного нанесення покриттів системи FeNbC із забезпеченням прогнозованого вмісту карбідної фази 40 - 80 мас. % для зміцнення робочих поверхонь зубів екскаваторів, які працюють у гірничорудній промисловості описано у роботі [4]. Як вихідний матеріал для нанесення покриттів використовували порошок фероніобію системи Fe-Nb35-C5-Al7-Ti2.5. Покриття було нанесено на зуби екскаваторів Volvo, які працюють у гірничорудній промисловості. Отриманий поверхневий шар товщиною 1,5 мм характеризується вираженою гетерофазовою композитною структурою, яка складається із великої кількості (~ 60 об. %) огранених зерен NbC розмірами 10-30 мкм, рівномірно розташованих у в'язкій сталевій матриці. Результати промислових випробовувань показали, що використання такого покриття дозволяє знизити масову інтенсивність абразивного зношування у 2 рази. Використання авторами [5] складної системи легування Fe-C-V-Cr-Nb-W при нанесенні покриттів із порошкових дротів на основу із сталі Hardox 450 дозволило отримати поверхневий шар товщиною ~ 2 мм із мікротвердістю ~ 12 ГПа, яка досягається за рахунок формування у структурі комплексних карбідів типу $M_{23}C_6$ та MC. Зносостійкість такого покриття за даними авторів у 140-150 перевищує зносостійкість Hardox 450.

Постановка завдання. Виходячи із проведеного літературного огляду метою дослідження було встановлення закономірностей формування структури, фазового складу та властивостей електродугових покриттів із порошкових дротів на основі високолегованої (марганцевої) сталі при додаванні до її складу карбіду ніобію.

Виклад основного матеріалу. Електродні матеріали для електродугового нанесення покриттів виготовляли у вигляді однозамкової порошкової стрічки шляхом закатування шихти в оболонку із сталі 08кп ГОСТ 3559-75. Порошкова шихта складалась із феросилікомарганцю МНС17 ГОСТ 4756-91 мас. %, графіту К-354 ГОСТ 7885-86, карбіду ніобію NbC ТУ 6-09-03-6-75 та добавок що забезпечують стабільність горіння дуги. Дослідження структури проводили методом електронної мікроскопії із використанням CarlZeiss, який включає у себе базовий блок EVO 40XVP оснащений детектором відбитих електронів (BSD). Наплавлення проводили на сталь 45 на постійному струмі зворотної полярності. Структуру покриттів досліджували методом електронної мікроскопії. Твердість покриттів вимірювали методом Роквелла у вихідному стані та після деформації. Деформацію проводили на пресі Брінеля шляхом втискування твердосплавної кульки із навантаженням 3000 кг, а твердість вимірювали у центрах залишених відбитків. Моделювання формування фазового складу проводили методом Calphad із використанням бази термодинамічних функцій, скомпільованої на основі даних роботи [6] та модуля розрахунку вільної енергії GES вбудованого у програмне забезпечення Thermo-calc 2003р. Перелік складів шихти електродних матеріалів наведено у таблиці 1, а розрахований із урахуванням коефіцієнту заповнення компонентний склад поверхневого шару у таблиці 2.

Таблиця 1 – Склад шихти порошкових електродів, мас. %

Зразок №	МНС 17	NbC	Графіт	Інші
1	70	0	2	28
2	74	6	2	18
3	69	13	2	16
4	67	19	2	12
5	65	24	2	9

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 –Розрахований елементний склад системи легування, ат. %

Зразок №	Fe	Mn	Nb	Si	C
1	63,93	17,62	-	8,61	6,84
2	63,80	17,81	1,35	8,70	8,35
3	63,43	16,56	2,71	8,09	9,21
4	62,50	15,79	3,88	7,71	10,12
5	61,69	15,11	4,93	7,38	10,88

Джерело: розроблено авторами

Аналіз побудованої діаграми стану марганцева сталь (FeMnSiC) – NbC (рис. 1) показує, що основними стабільними фазами у даній системи є : твердий розчин на основі NbC, аустеніт (А), ферит (Ф), карбід цементитного типу (Ц), карбідна фаза типу M_5C_2 а також карбосиліцид заліза Fe_8Si_2C. Розглянута система відноситься до евтектичного типу із температурою початку евтектичного перетворення ~ 1500 К. Інтервал кристалізації аустеніту із розплаву є достатньо вузьким та не перевищує 150 К. Підвищення вмісту NbC веде до суттєвого підвищення температури ліквідуса системи, зниження стабільності карбідної M_5C_2 і карбосиліцидної фази Fe_8Si_2C за рахунок розширення області існування А+ NbC+Ц та практично не впливає на температуру початку кристалізації аустеніту та ширину температурного діапазону його кристалізації. Кристалізація сплавів що відповідають дослідним електродним матеріалам № 2 – 5 проходить за ідентичною схемою : не першому етапі із розплаву

кристалізується NbC далі, при досягненні температури ~ 1500 К, починається одночасна кристалізація аустеніту та NbC за евтектичною схемою. При подальшому охолодженні у твердому стані із аустеніту виділяється карбід типу M_5C_2, який при зниженні температури повністю переходить у цементит. Продовження зниження температури веде до початку перетворення А→Ф при ~ 1000 К, яке завершується при температурі ~ 900 К. Таким чином, рівноважна структура сплавів при кімнатній температурі трифазова і складається із фериту, NbC та цементиту. В реальних умовах кристалізації наплавленого шару внаслідок неможливості повного проходження дифузійного перерозподілу вуглецю у системі буде фіксуватись стан, який на рівноважній діаграмі стану відповідає областям, що межують із лінією солідус системи. У даному випадку це відповідає структурі А+ NbC та А+ NbC+Ц.

Характер кристалізації NbC із розплаву для досліджених сплавів (рис. 2) також є ідентичним: виділення NbC починається із розплаву; інтенсивне збільшення кількості карбідної фази спостерігається за температур кристалізації аустеніту; при охолодженні у твердому стані кількість NbC незначно зменшується головним чином за рахунок утворення карбідних фаз M_3C та M_5C_2. З результатами розрахунків рівноважна кількість NbC у сплавах № 2, 3, 4 та 5 буде становити ~ 3, ~ 6, ~ 8,5 та ~ 10 об. %, відповідно.

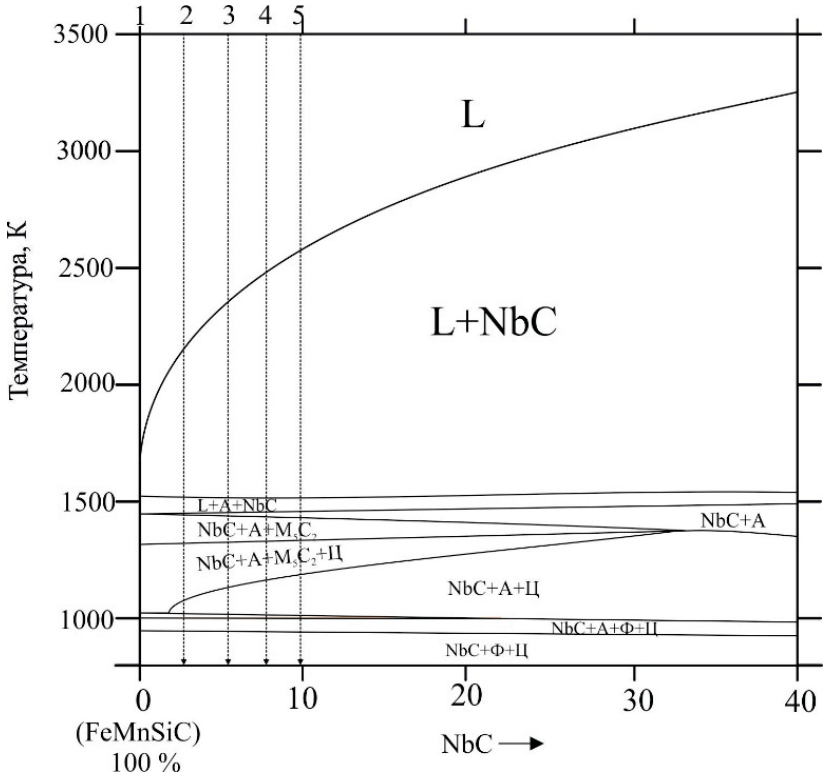

Рисунок 1 – Фрагмент псевдобінарної діаграми стану FeMnSiC – NbC

Джерело: розроблено авторами

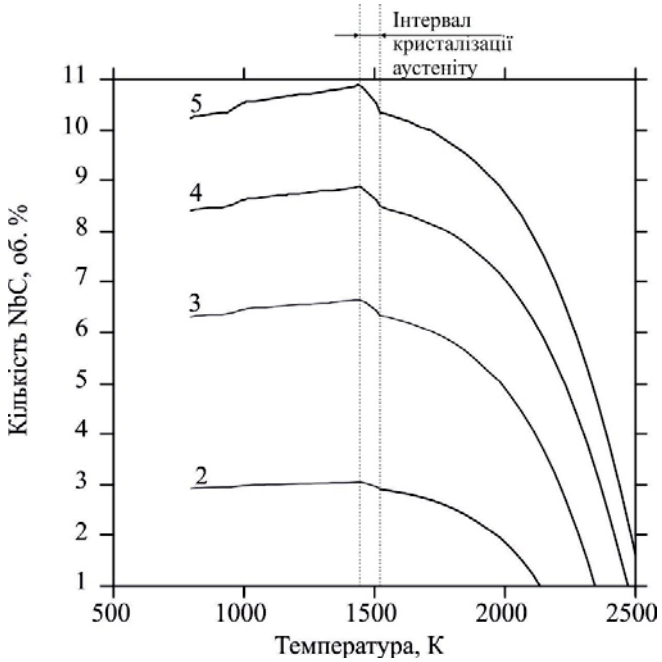

Рисунок 2 – Залежність рівноважної кількості NbC від температури для зразків № 2 -5

Джерело: розроблено авторами

Результати дослідження мікроструктури поверхневого шару, наплавленого порошковим електродним матеріалом системи Fe-Mn-Nb-Si-C (рис. 3) показують, що він складається із однорідної фази, яка представляє собою марганцевий аустеніт, у якому рівномірно розташовані дисперсні (розмірами ~ 3 мкм) включення NbC ограненої форми. Така структура відповідає розрахованому складу та має композитну будову, що сприяє підвищенню механічних властивостей.

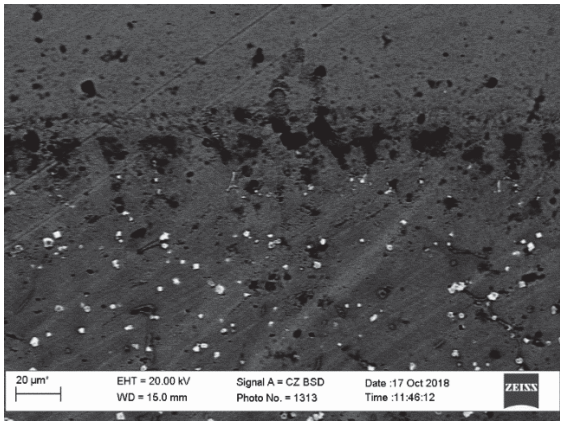

Рисунок 3 – Структура електродугового покриття системи Fe-Mn-Nb-Si-C (вміст NbC ~ 10 %)

Джерело: розроблено авторами

Результати вимірювання твердості поверхневого шару залежно від кількості NbC до деформації та після показують, що у недеформованих покриттях при збільшенні вмісту NbC від 0 до 10 об. % спостерігається пропорційне збільшення твердості за залежністю близькою до лінійної від 20 до 35 HRC. Таке зростання твердості закономірно зумовлено збільшенням у структурі більш твердої фази, що

також передбачає підвищення абразивної зносостійкості. Однак, при вимірюванні твердості деформованих шарів спостерігається інша тенденція – збільшення вмісту NbC від 0 до 6 об. % не веде до зростання твердості деформованого шару, проте підвищенні вмісту NbC понад 6 об. % відбується інтенсивний ріст твердості наклепаного шару, яка при вмісті 10 об. % становить 54 HRC. Такий характер росту твердості наклепаного шару при збільшенні у ньому кількості включень твердої фази можна пояснити тим, що при збільшенні кількості зерен NbC у структурі відстані між частинками зменшуються і матеріал покриття деформується більш інтенсивно у міжкарбідних мікрооб'ємах. Крім того, огранена форма частинок NbC є додатковим джерелом концентраторів напружень, що інтенсифікують наклеп.

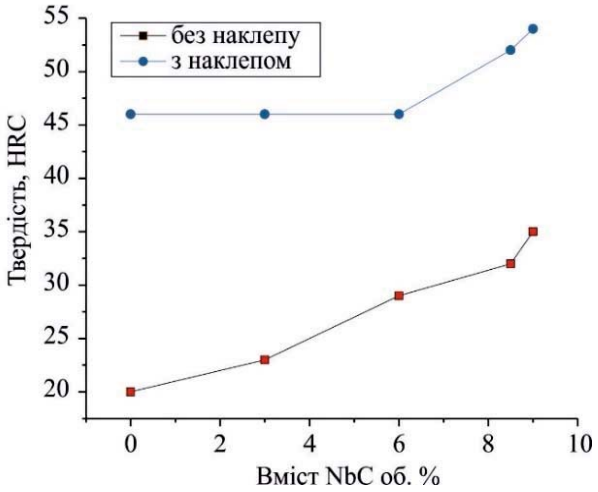

Рисунок 4 – Структура електродугового покриття системи Fe-Mn-Nb-Si-C (вміст NbC ~ 10 %)

Джерело: розроблено авторами

Висновки. За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено систему легування порошкових електродних матеріалів для зміцнення робочих органів землерийної техніки, яка працює за умов значних динамічних навантажень в абразивних середовищах. Встановлено, що при легуванні електродних матеріалів на основі марганцевих сталей близьких за складом до сталі 110Г13Л карбідом ніобію в кількості більше 6 об. % суттєво зростає як вихідна твердість (до наклепу так і твердість після деформації. Отримане значення твердості деформованого шару - 54 HRC значно перевищує твердість після деформації поверхневих шарів, отриманих шляхом електродугового наплавлення серійними електродами на основі високомарганцевих сталей (46 HRC). У подальших дослідженнях слід провести визначення абразивної зносостійкості розроблених покриттів при випробовуваннях за різними схемами навантаження.

Список літератури

1. Selection of the most appropriate welding technology for hardfacing of bucket teeth. / Vukic Lazic at el. *Materials and tehnology*. 2015. Vol. 49, № 1. P. 165–172.
2. Левчук О. В., Здобицький А. Я. Відновлення робочих органів ґрунтообробних знарядь електродуговим навуглецьовуванням. *Інженерія природокористування.* 2017. № 3. С. 69–73.
3. Selection of the most appropriate welding technology for hardfacing of bucket teeth. / Pascu D. R. at el. *In Advanced Materials Research. Trans Tech Publications.* 2015. Vol. 1111. P. 246–251.
4. Tavares Galvani E., Simoes S., Novaes Banov C. H., Rosa H. Application of FeNbC as a hardfacing material using laser cladding–part II. 2017. № 606. P. 195–206.

5. Phase composition and defect substructure of double surfacing, formed with V–Cr–Nb–W powder wire on steel. / Konovalov S. V. at el. *Inorganic Materials: Applied Research.* 2017. № 8(2), P. 313–317.
6. PrecHiMn-4—A thermodynamic database for high-Mn steels. / Hallstedt B. at el. *Calphad.* 2017. Vol. 56. P. 49–57.

References

1. Lazic, V., Sedmak, A., Nikolic, Ruica R., Mutavdzic, M., Aleksandrovic S., Krstic B., Milosavljevic, D., (2015). Selection of the most appropriate welding technology for hardfacing of bucket teeth. *Materials and tehnology*, *49*(*1*), 165-172 [in English].
2. Levchuk, O. V., & Zdobytskyi, A. Ya. (2017). Vidnovlennia robochykh orhaniv gruntoobrobnykh znariad elektroduhovym navuhlets'ovuvanniam. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*, (2 (8)), 69-73 [in Ukrainian].
3. Pascu, D. R., Buzdugan, R. M., Bîrdeanu, A. V., Tihanov, D., & Binchiciu, E. (2015). Structural Hardening of Excavator Teeth Used in Exploitation of Magmatic Rocks. In *Advanced Materials Research* (Vol. 1111, pp. 246-251). Trans Tech Publications [in English].
4. Eduardo, T. G., Sergio, S., Carlos Henrique, N. B., Hugo Leandro, R., Eduardo, C., & Edmundo, B. C. (2017). Application of FeNbC as a Hardfacing Material Using Laser Cladding–Part II. *Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites XI: Ceramic Engineering and Science Proceedings Volume 37, Issue 2*, *37*, 195-206 [in English].
5. Konovalov, S. V., Kormyshev, V. E., Gromov, V. E., Ivanov, Y. F., & Kapralov, E. V. (2017). Phase composition and defect substructure of double surfacing, formed with V–Cr–Nb–W powder wire on steel. *Inorganic Materials: Applied Research*, *8*(2), 313-317 [in English].
6. Hallstedt, B., Khvan, A. V., Lindahl, B. B., Selleby, M., & Liu, S. (2017). PrecHiMn-4–A thermodynamic database for high-Mn steels. *Calphad*, *56*, 49-57 [in English].

Pavlo Prysyazhnyuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Roman Andrusyshyn,** post-graduate, **Lyubomyr Lutsak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olexandr Ivanov,** post-graduate
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Formation of Phase Composition, Structure and Properties of Electric Arc Coatings of Fe-Mn-Nb-Si-C System for Hardfacing of Working Surfaces of Earthmoving Equipment

The purpose of the study was to establish the regularities of formation of the structure, phase composition and properties of electric arc coatings of powder wires based on high-alloy (manganese) steel with niobioum carbide additions using CALPHAD method together with expiremental investigation of structure and properties and obtainig the hardfacing material with high impact arbasive wear resistance for earth moving machines equipment.

Using the free energy calculations of a multicomponent system by the Calpad method, a pseudobinary phase diagram of a highmanganese steel - niobium carbide system was constructed. The use of the diagram made it possible to predict the phase and elemental composition of electric arc coatings made of powder electrode materials. The proposed alloying system allows to obtain a surface layer consisting of two phases: manganese austenite and niobium carbide in the form of dispersed inclusions. The results of measuring the hardness of the arc coatings of the proposed doping system show that increasing the content of niobium carbide in high manganese hardfacing alloy from 0 to 10 vol. % leads to an increase in the hardness of the surface layer from 20 to 35 HRC in the undeformed state and from 46 to 54 in the deformed state. The results show that the presence of disperse NbC inclusions in the amount of more than 6 % by volume increases the intensity of hardening of the surface layer during deformation due to the formation of microregions with high level of internal stresses.

According to the results of theoretical and experimental researches, a system of doping of powder electrode materials was developed to strengthen the working bodies of earthmoving equipment, which operates under conditions of considerable dynamic loads in abrasive media. It is established that when alloying electrode materials based on manganese steels close in composition to 110G13L steel, niobium carbide significantly increases both the initial hardness (before deformation) and the hardness after deformation. The obtained value of the hardness of the deformed layer - 54 HRC significantly exceeds the hardness of the serial high-manganese alloys (46 HRC) hardfacings.

electric surfacing, powder wires, high manganese steel, niobium carbide, hardening

Одержано (Received) 02.12.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 16.12.2019*
Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019