УДК 620.178.16 DOI: https://doi.org/10.37434/as2020.10.06

РОЗРОБКА НОВИХ ЕЛЕКТРОДНИХ МАТЕРІАЛІВ, МЕТОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗАХИСТУ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ, ЯКІ ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ТА ГАЗОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

М. М. Студент, А.А. Войтович, Я.Я. Сірак, В.М. Гвоздецький

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: pminasu@ipm.lviv.ua

Широкий спектр деталей та устаткування підприємств хімічної, нафтової, сільськогосподарської, машинобудівної, транспортної, енергетичної та інших галузей промисловості експлуатуються в умовах абразивного зношування. В Україні для захисту від абразивного зношування та відновлення зношених поверхонь наплавленням широко використовують електродугове наплавлення порошковими дротами системи Fe–Cr–B–C. Такі порошкові дроти мають низьку вартість, а наплавлений метал – задовільну зносостійкість. Однак основним недоліком шарів, наплавлених такими порошковими дротами, є дендрити першого та другого порядку з голкоподібною морфологією. Гострі вершини твердої фази виконують роль концентраторів напружень, від яких за удару розпочинається розтріскування наплавленого металу з подальшим його викришуванням. Відомо, що формування округлених зміцнювальних фаз зменшує концентрацію напружень у наплавленому шарі і як наслідок підвищує зносостійкість. В даній роботі запропоновано диспергування структурних складових в наплавленому металі наплавленням за дії на наплавлений метал механічної вібрації, що особливо доцільно застосовувати для виготовлення наплавленням біметалевих зносостійких пластин, а для великогабаритних деталей запропоновано диспергування структурних складових в наплавленому металі модифікуванням шихти порошковими дротами системи Fe–Cr–B–C додаванням до неї порошку алюмінієво-магнієвої лігатури ПАМ-4. Бібліогр. 5, табл. 2, рис. 5

Ключові слова: наплавлення, біметалеві листи, зносостійкість, боридні включення

Матеріали та методики досліджень. Для формування наплавленого металу використано порошкові дроти (ПД) діаметром 3,2 мм. Їх оболонка виготовлена з низьковуглецевої сталі 08кп, заповнена порошковою шихтою на основі феросплавів. Для дослідження обрано ПД, які у наплавленому металі мають феритну або аустенітну матрицю. Хімічний склад ПД (табл. 1) містить високу кількість хрому, бору, що позитивно впливає на зносостійкість наплавленого металу, оскільки у структурі виділяються тверді боридні включення.

Додавання порошку алюміній-магнієвої лігатури ПАМ-4 у шихту ПД під час наплавлення утворює у зварювальній ванні дисперсний оксид магнію, що впливає на диспергування структурних складових, а також зміцнення наплавленого шару.

Методики досліджень. Наплавлений ПД метал формували за допомогою підвісної головки АБС (джерело живлення – генератор ПСО 500). Для захисту від атмосферного впливу застосовано флюс ОСЦ 45. Формування наплавленого металу із ПД виконали на металеву підкладку зі сталі Ст3сп, розміром 150×300 мм у два шари. Вібраційну обробку [1–5] ванни розплавленого металу у зоні горіння електричної дуги проведено за наступних режимів: частота коливань – 100 Гц, амплітуда – 0, 70, 300 мкм за горизонтальної вібрації. Мікроструктуру наплавлених шарів досліджували на поперечному мікрошліфі із використанням електронного мікроскопа EVO 40 XVP. Вимірювання твердості виконували на мікротвердомірі ПМТ-3 з вагою наважки 200 г. Зносостійкість наплавлених шарів досліджено за різних умов зношування. Абразивне зношування незакріпленим абразивом оцінювали згідно ГОСТ 23.208-79 (рис. 1). Просушений кварцовий пісок з розміром часточок 200...1000 мкм безперервно подавали у зону контакту гумового диску і зразка. Швидкість обертання диску становила 25 м/с, а сила його притискання до зразка 2,4 кН.

Для оцінювання зношування закріпленим абразивом (рис. 2) використали абразивний круг СМ-2 на керамічній зв'язці. Лінійна швидкість тертя

Таблиця 1. Хімічний склад шихти використаних порошкових дротів, мас. %

Марка ПД	C	B	Cr	Ti	Mn	Al	Mg	Si	Fe
Х10Р3Г2С (феритна матриця)	0,08	3,5	10,0	–	2,0	–	–	1,0	Решта
80Х20Р3Т (аустенітна матриця)	0,8	3,0	20,0	1,0	–	–	–		
80Х20Р3Т + 1 % ПАМ (аустенітна матриця)	0,8	3,0	20,0	1,0	–	1,0	0,3		

Студент М. М. – https://orcid.org/0000-0002-5992-5898, Сірак Я.Я. – https://orcid.org/0000-0001-8748-8456
© М. М. Студент, А.А. Войтович, Я.Я. Сірак, В.М. Гвоздецький, 2020

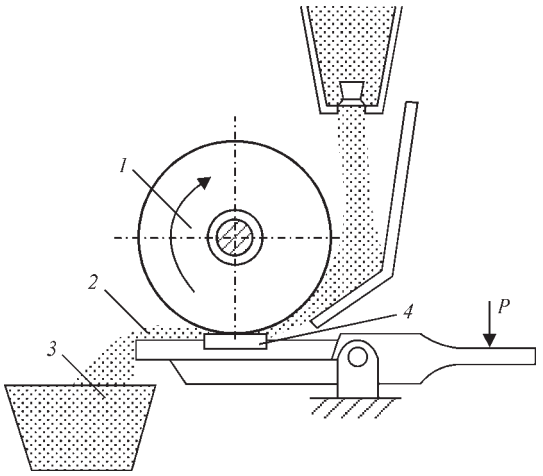

Рис. 1. Схема установки для дослідження абразивного зношування незакріпленим абразивом: *1* – гумовий диск; *2* – пісок; *3* – ємність для збирання абразиву; *4* – зразок

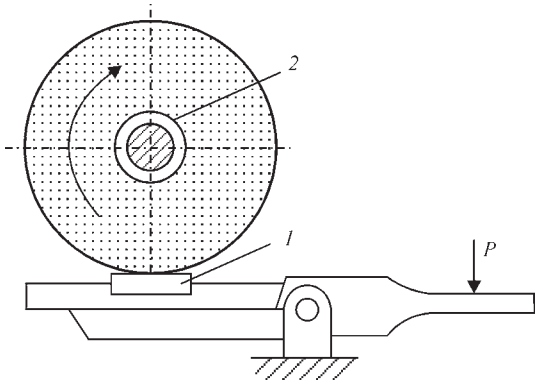

Рис. 2. Схема установки для дослідження зношування зразків жорстко закріпленим абразивом: *1* – зразок; *2* – абразивний круг

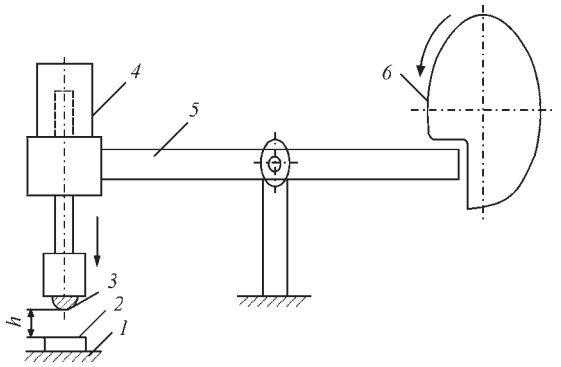

Рис. 3. Схема установки для дослідження ударного зношування зразків: *1* – основа; *2* – зразок; *3* – індентор; *4* – наважка; *5* – коромисло; *6* – ексцентрик; *h* – віддаль від зразка 10 мм

при цьому становила 0,4 м/с, навантаження в зоні лінійного контакту 1,5 кН.

Ударне зношування (рис. 3) оцінили за сили удару 12 кДж кулькою діаметром 25 мм зі сталі ШХ 15, яка падала на досліджувану поверхню з частотою 40 $с^{-1}$. Тривалість експерименту 3600 с. Втрату маси зразків визначали з точністю до $2 \cdot 10^{-4}$ г на електронній вазі.

Структура наплавленого металу. Фазовим аналізом встановлено, що наплавлений без вібрації метал із ПД Х10Р3Г2С складається із феритної матриці, легованої хромом, та боридних включень (FeCr)B, $(FeCr)_2B$. Із літератури відомо, що фаза $(FeCr)_2B$ містить меншу кількість хрому та бору, ніж фаза (FeCr)B і характеризується меншою твердістю, проте значно більшою пластичністю. Місце розташування включень (FeCr)B, $(FeCr)_2B$ у структурі наплавленого металу ідентифікували мікроспектральним аналізом на шліфах. Виявили, що включення боридів типу (FeCr)B крупні та темніші, бориди типу $(FeCr)_2B$ значно дрібніші та світліші (рис. 4).

У вихідному металі з ПД Х10Р3Г2С середній розмір включень боридів (FeCr)B, $(FeCr)_2B$ у структурі на гребені валиків змінювався від 20 до 75 мкм, а в зоні їх перекривання – від 50 до 150 мкм. За горизонтальної вібрації амплітудою 300 мкм середній розмір боридів (FeCr)B, $(FeCr)_2B$ зменшився до 5…10 мкм. Отримані результати дають підстави стверджувати, що горизонтальна вібрація істотно диспергує структурні складові металу, наплавленого ПД Х10Р3Г2С. Перевірено це також на структурі металу, наплавленого дротом ПД 80Х20Р3Т за амплітуди коливань підкладки 70, 200 та 300 мкм. Виявлено, що і у цьому випадку структурні складові наплавленого металу (боридні включення) суттєво подрібнювалися зі зростанням амплітуди вібрації під час наплавлення. Зокрема, боридні включення (FeCr)B, $(FeCr)_2B$ максимально подрібнилися за вібрації амплітудою 300 мкм. Середній розмір включень при цьому 1…5 мкм. Наплавлення із застосуванням вібрації великогабаритних деталей складної форми суттєво ускладнюється або стає неможливим. У

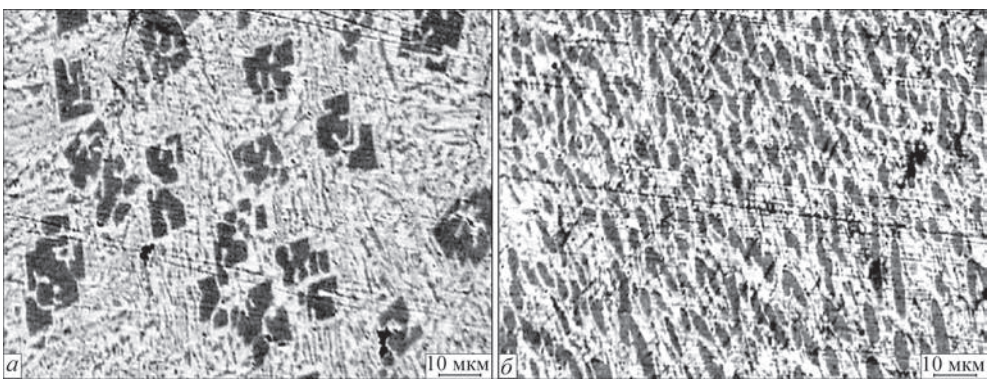

Рис. 4. Мікроструктура на гребенях валиків металу, наплавленого ПД Х10Р3Г2С: *а* – без вібрації; *б* – з вібрацією амплітудою 300 мкм

цьому випадку запропонували впливати на мікроструктуру наплавленого металу, додаючи до шихти ПД 80Х20Р3Т до 2 мас. % порошку ПАМ-4. Завдяки цьому виникають передумови для окиснення магнію, розташованого в порожнинах шихти ПД, з утворенням дисперсних часточок оксиду магнію, які стають центрами кристалізації і росту кількості зерен з розплаву наплавленого металу.

У металі, наплавленому ПД 80Х20Р3Т без додавання ПАМ, голкоподібні крупні бориди (FeCr)B та дрібні $(FeCr)_2B$ розташовані на фоні аустенітної матриці. Порівняли мікроструктуру металу, наплавленого ПД 80Х20Р3Т базового складу і з додаванням до шихти порошку ПАМ, та встановили, що легування магнієм сприяє подрібненню боридів та їх глобулізації.

Спектральним та фазовим аналізами встановлено, що з додаванням до шихти ПД порошку ПАМ в мікроструктурі наплавленого металу переважали бориди типу $(FeCr)_2B$. У металі, наплавленому ПД 80Х20Р3Т базового складу, розмір боридів становив 30…120 мкм, а в наплавленому ПД з додаванням ПАМ-4 їх діаметр зменшився, в середньому, у 8 разів.

Зносостійкість наплавлених шарів. Встановлено, що шари, наплавлені в умовах механічної вібрації, мають підвищену абразивну зносостійкість. Зокрема, абразивна зносостійкість наплавленого шару закріпленим абразивом зросла в 2,5 рази, незакріпленим – в 2,3 рази, в умовах циклічного ударного навантаження – у 2,8 разів. Підвищення зносостійкості шарів, наплавлених в умовах механічної вібрації, зумовлено суттєвим зменшенням розміру дисперсних зміцнювальних фаз (боридів) та зміною їх фазового складу. Зокрема, зі зменшення середнього розміру боридних включень від 75 до 5 мкм зросла його мікротвердість – від *HV* 700 до *HV* 9300. Зі збільшенням вмісту фази $(FeCr)_2B$ у наплавленому шарі підвищується модуль Юнга та опір крихкому руйнуванню, що також вплинуло на зростання зносостійкості наплавленого шару (табл. 2).

Таблиця 2. Відносна зносостійкість наплавленого металу з ПД Х10Р3Г2С в умовах абразивного зношування у відношенні наплавленого металу без вібрації

Умови наплавлення	Без вібрації	Горизонтальна вібрація	
Амплітуда механічних коливань, мкм	–	70	300
Середній розмір боридів, мкм	75	10	5
Закріпленим абразивом	1	1,4	2,5
Незакріпленим абразивом	1	1,5	2,3
За умов ударних навантажень	1	2,4	2,8
Співвідношення фаз $(FeCr)B/(FeCr)_2B$	4/1	2,5/4	1/5

Накладання вібрації під час наплавлення металу з ПД 80Х20Р3Т, як і для металу, наплавленого ПД Х10Р3Г2С, також веде до суттєвого зменшення середнього розміру боридних включень, і, як наслідок, зростає його зносостійкість. Зокрема, із зменшенням середнього розміру боридних включень від 70 до 5 мкм за умов зношування закріпленим та незакріпленим абразивом зносостійкість наплавленого металу зростає у 1,7 разів, а при зношуванні під дією циклічних ударних навантажень – вдвічі.

Додавання до шихти ПД 80Х20Р3Т 1 мас. % ПАМ-4 сприяє підвищенню зносостійкості наплавленого металу в 1,6 рази за умов зношування закріпленим та незакріпленим абразивом; за зношування під дією циклічних ударних навантажень зносостійкість підвищилася у 1,8 разів порівняно з металом, наплавленим ПД базового складу. Це зростання зумовлено підвищенням твердості наплавленого шару, як через диспергування зміцнювальної боридної фази, так і завдяки додатковому виділенню дрібнодисперсних складно-легованих нітридів у структурі наплавленого шару.

Як приклад застосування процесу наплавлення ПД, було виконано роботи з відновлення млинового вентилятора ВМ 100/1200 для Бурштинської ТЕС. В системі пилоприготування котельних станцій, які працюють на твердому паливі, важливими складовими є млинові вентилятори. Вони здійснюють пневматичне транспортування вугільного пилу (фракцією менше 100 мкм) з температурою вищою за 320 К від циклонів до живильників пилу, і далі – в топку парогенераторів. Тому в ході експлуатації описаних елементів котельних станцій спостерігається інтенсивний і нерівномірний знос їх робочих лопастей, дисків та стінок камер. Нерівномірний знос лопастей веде до зниження потужності вентиляторів і димовтягувачів, розбалансування роторів, сприяє вібрації підшипників, і, в кінцевому підсумку, руйнує підшипникові вузли. Час безперервної роботи димовтягувачів у деяких випадках лише 2…3 тижні.

Виготовлення нового млинового колеса вимагає значно більших витрат, ніж наплавлення захисних покриттів. Основним шляхом продовження експлуатації млинового колеса є його ремонт або заміна. Ремонт пропонується для відновлення геометричних розмірів.

Основний метод нанесення захисного покриття – півавтоматичне наплавлення. Це наплавлення дозволяє наносити покриття навіть у важкодоступних місцях. Для ремонту та зміцнення млинового вентилятора ВМ 100/1200 застосовували ПД 80Х20Р3ТMg, який був розроблений на базі ПД 80Х20Р3Т з додаванням до шихти 1 мас. % алюмінієво-магнієвої лігатури ПАМ-4 (рис. 5).

Дослідно-промислова перевірка експлуатації млинових вентиляторів, захищених наплавленим

Рис. 5. Зношена (*а*) та наплавлена (*б*) лопатка колеса млинового вентилятора, відновлені колеса млинового вентилятора ВМ 100/1200 (*в*)

шаром із дроту ПП-Нп-80Х20Р3Т, модифікованим алюмінієво-магнієвою лігатурою, проведена Фізико-механічним інститутом спільно із ДП «Львівське конструкторське бюро» на Бурштинській ТЕС, показала, що ресурс зміцнених робочих коліс вентиляторів ВМ 100/1200 зріс у 2,5 рази.

Висновки

1. Встановлено, що вібрація деталі під час її наплавлення зумовлює диспергування структури наплавленого металу, внаслідок чого середній розмір окремих боридних включень зменшується від 50…150 до 5…10 мкм.

2. Механічна вібрація сприяє перерозподілу фаз під час наплавлення, через що мікротвердість наплавленого металу зростає від *HV* 600 до *HV* 870 та рівномірніше розподіляється на поверхні наплавленого металу. Наплавлені шари, отримані за горизонтальної вібрації, виявили підвищену (у 2,3…2,5 рази) абразивну зносостійкість за тертя закріпленим та незакріпленим абразивом порівняно зі шаром, наплавленим без вібрації.

3. Встановлено, що вібрація під час наплавлення шарів підвищує (у 1,8 рази) їх стійкість за циклічного ударного навантаження. Основним чинником впливу на ударне зношування наплавленого металу стає його здатність пластично деформуватися і, відповідно, релаксувати напруження.

4. Виявлено, що додавання до шихти ПД базової системи Fe–Cr–B–C порошку ПАМ-4 (до 1 мас. %) сприяє подрібненню включень боридів у наплавленому металі (до 7 разів) та підвищення абразивної зносостійкості в 1,6…1,8 рази.

Робота виконана у рамках комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу та безпечної експлуатації конструкцій, споруд і машин» у 2016–2020 рр.

Список літератури/References

1. Kuskov, Y.M., Zhdanov, V.A., Ryabtsev, I.O. et al. (2020) Methods for Increasing the Corrosion Resistance of Coatings Deposited under a Flux Layer from High-Chromium Powder Wires. *Materials Science*, 55, **5**, 710–715.
2. Student, M., Vojtovych, A., Pokhmurska, H. et al. (2019) Mechanical characteristics and wear resistance of the cladding layers obtained by melting of cored wires with simultaneous vibration of substrate. *Strojnicky Casopis*, 69, **1**, 109–122.
3. Pokhmurs'ka, H.V., Student, M.M., Lanets', O.S., Voitovych, A.A. (2015) Influence of Vibration in the Course of Surfacing of a Protective Layer on Its Microstructure and Impact-Abrasive Wear. *Materials Science*, 51, **3**, 412–417.
4. Voitovych, A.A., Pokhmurs'ka, H.V., Student, M.M., Student, O.Z. (2016) Microstructure and abrasive-wear resistance of the vibration-deposited metal of core wires of the basic Fe–Cr–B system. *Ibid*, 52, **3**, 365–370.
5. Pokhmurs'ka, H.V., Student, M.M., Dzyubyk, A.R. et al. (2017) Corrosion resistance of the metal vibration deposited from flux-core wires based on the Fe–Cr–B system. *Ibid*, 52, **5**, 694–699.

DEVELOPMENT OF NEW ELECTRODE MATERIALS, METHODS OF RESTORATION AND PROTECTION OF THIN-WALLED PARTS OF EQUIPMENT, WHICH ARE OPERATED IN THE CONDITIONS OF GAS ABRASIVE WEAR

M. M. Student, A.A. Voytovych, Ya.Ya. Sirak, V.M. Gvozdetsky

G.V. Karpenko Physical-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.
E-mail: pminasu@ipm.lviv.ua

A wide range of parts and equipment of chemical, oil, agricultural, machine-building, transport, energy and other industries are operated in abrasive conditions. In Ukraine, electric arc surfacing with flux-cored wires of the Fe – Cr – B – C system is widely used to protect against abrasive wear and restore worn surfaces by surfacing. Such flux-cored wires have a low cost and the deposited metal has a satisfactory wear resistance. However, the main disadvantage of the layers, deposited with such flux-cored wires are dendrites of the first and second order with acicular morphology. Sharp peaks of the solid phase act as stress concentrators, from which after impact the cracking of the deposited metal begins, followed by its chipping. It is known that the formation of rounded reinforcing phases reduces the concentration of stresses in the deposited layer and, as a consequence, increases wear resistance. This paper proposes the dispersion of structural components in the deposited metal by surfacing under the action of mechanical vibration on the deposited metal, which is especially useful for manufacture of surfacing bimetallic wear plates, and for large-sized parts a dispersion of structural components in the deposited metal Fe – B – C is proposed by adding the powder of aluminum-magnesium master alloy PAM-4 to it. 5 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Key words: surfacing, bimetallic sheets, wear resistance, boride inclusions

Надійшла до редакції 28.09.2020