

ДУГОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ЧЕРВ'ЯЧНОГО ШНЕКА БІСЕРНОГО МЛИНА

В.В. Перемітько, С.О. Плітченко, В.В. Герасімов, В.І. Сухомлин, О.С. Очеретько

Дніпровський державний технічний університет. 51918, м. Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2. E-mail: vperemitko@dstu.dp.ua

Дослідження спрямоване на розробку раціональної технології відновлення зношених ділянок робочих поверхонь сегментів черв'ячного шнека бісерного млина типу МТ-140 та підвищення їхнього експлуатаційного ресурсу. Матеріалом для дослідження слугували зношені сегменти з сірого хромистого чавуну марки ЧХ1. Для відновлення застосовано технологію дугового наплавлення порошковими дротами марок SK A43-О, ВЕЛТЕК Н-590, ВЕЛТЕК Н-290 та Supershield CrC. Наплавлення проводилось у два шари з різною орієнтацією валиків при попередньому підігріві до 400...450 °С за допомогою зварювального напівавтомата Lorch Micormig 350A за $I = 200$ А, $U = 30$ В. Найкращі показники зносостійкості демонструють високолеговані дроти SK A43-О та Supershield CrC завдяки формуванню значної частки твердих карбідів хрому та ніобію. Підтверджено, що пропорційної залежності між твердістю наплавлених шарів та їхньою стійкістю до зносу не спостерігається. Встановлено, що орієнтація наплавочних валиків по радіусу сегмента впливає на інтенсивність зносу робочої поверхні деталі. Для відновного наплавлення сегментів пропонується застосування порошкових дротів, які забезпечують формування у нанесених шарах або жорсткого карбідного каркасу, або пластичної матриці, що здатні забезпечити підвищену опірність до комбінованого кавітаційного та гідроабразивного впливу. Бібліогр. 17, табл. 3, рис. 8.

Ключові слова: бісерний млин, сегменти, чавун марки ЧХ1, гідроабразивний та кавітаційний знос, відновлення, порошкові дроти, карбідний каркас, пластична матриця, втрата маси

Вступ. Бісерні млини призначені для подрібнення широкого кола матеріалів у багатьох галузях промисловості [1]. На вітчизняних лакофарбових виробництвах на даний час поширеним є бісерний млин типу МТ-140. Перетирання матеріалу відбувається в спеціальній робочій камері млина, у суспензії та під дією технічного бісеру, якому задається рух за допомогою черв'ячного валу, що складається з окремих сегментів (рис. 1, а).

Під час роботи млина через постійні процеси перетирання лакофарбових складових, окрім бісеру, зазнають суттєвого зносу й сегменти черв'ячного валу. У результаті реалізації комбінованого механізму гідроабразивного зносу на робочій поверхні шнекового сегмента утворюється хвилястість (рис. 1, б). Наявність на зношених робочих зонах хвилеподібного рельєфу з гладкими поверхнями пояснюється виникненням ефекту кавітаційного зношування після багаторазових повторюваних ударів рідини [2] та переважальними траєкторіями шароподібного бісеру, який чинить додатковий руйнівний вплив. У міру зростання гребнів на поверхні сегмента пропорційно зменшується строк його ефективної експлуатації, зростає ризик виходу його з ладу через злам.

Заміна сегментів на млинах типу МТ-140 ускладнена через велику вагу черв'ячного валу разом із сегментами та конструкційні особливос-

ті млина. Зазначена операція викликає тривалий простій обладнання та призводить до значних економічних втрат, а у випадку зламу елемента сегмента – й до ремонту обладнання млина. Звідси виникає актуальна задача підвищення довговічності роботи сегментів через надання їхнім робочим поверхням більшої зносостійкості.

Економічно доцільно покращувати початкові характеристики шляхом наплавлення шару металу з визначеними механічними властивостями на поверхні сегментів, які потребують відновлення [3, 4]. Комплекс високих механічних властивостей відновлених поверхонь забезпечується, перш за все, оптимальним хімічним складом наплавленого металу. Додавання до складу таких елементів, як Cr, Mn, Si та V дозволяє покращити необхідні механічні властивості [5].

Для систем Fe–Cr–C додавання Nb та V забезпечує формування надтвердих спеціальних карбідів (NbC та VC), які мають вищу опірність до абразивного зносу порівняно з карбідами хрому [6, 7]. Крім того, ці елементи рафінують структуру: карбіди Nb та V виступають додатковими центрами гетерогенного зародження фаз під час кристалізації, що призводить до подрібнення структурних складових наплавленого металу.

Параметри процесу (струм, напруга, швидкість, кількість шарів) істотно впливають на морфологію карбідів і, як наслідок, на твердість і механізми зношування [8]. У середовищах гідроабразивної ерозії та кавітації для чавунів значення мають

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

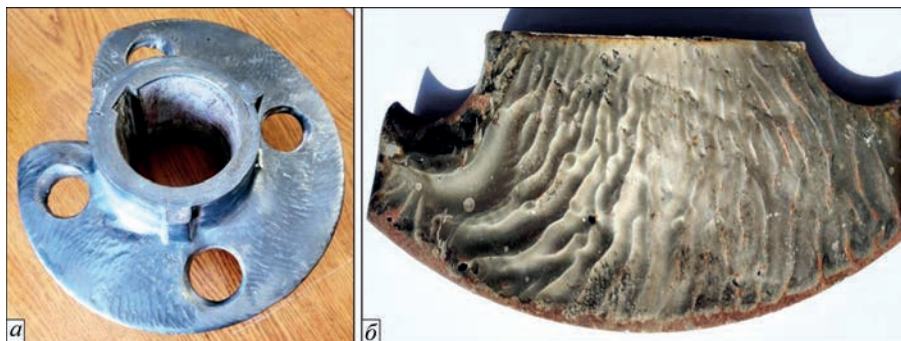


Рис. 1. Сегмент черв'ячного валу бісерного млина типу МТ-140 (а) та його зношена поверхня (б)

не лише твердість, а й тип матриці (ферит, перліт, аустеніт), що може суттєво зменшити швидкість втрати маси при зносі [9, 10]. При цьому локальна орієнтація наплавлених валиків відносно напрямку абразивного потоку здатна змінювати інтенсивність зношування, що слід враховувати при ремонтних роботах [8, 11, 12].

З іншого боку, при виборі наплавних дрітів важливо забезпечити відносно низьку собівартість, що досягається за рахунок зниження концентрації кошовних легуючих елементів.

Метою роботи є дослідження та розробка раціональної технології відновлення зношених ділянок робочих поверхонь сегментів черв'ячного валу бісерного млина та підвищення їхнього експлуатаційного ресурсу.

Обладнання, матеріали та методика проведення експериментів. В якості основного металу використовувалися зношені поверхні сегментів із сірого хромистого чавуну марки ЧХ1, який випускався за ГОСТ 7769-82, що діяв в Україні до 01.01.2022 р. та замінюється європейськими стандартами. Поверхні зразків до початку наплавлення зачищали від бруду, іржі та неметалевих включень. Безпосередньо перед наплавленням виконували попередній підігрів зразків до температури 400...450 °С. Електродугове наплавлення проводилось на постійному струмі зворотної полярності, у два шари, порошковим дротом діаметром 1,6 мм марок SK-A43-O, ВЕЛТЕК Н-590, ВЕЛТЕК Н-290 та Supershield CrC за допомогою зварювального напівавтомата Lorch Micormig 350A. Для всіх дрітів приймали однакові режими наплавлення: величина струму $I = 200$ А, напруга $U = 30$ В, швидкість наплавлення 18...22 м/год та

виліт дроту 15...20 мм. Після завершення процесу з відновлених сегментів виготовляли металографічні шліфи за стандартною методикою: механічна вирізка шліфа з поперечного перерізу робочої частини сегмента із супутнім охолодженням, послідовне шліфування та полірування алмазними пастами. Для виявлення фазового складу застосовували травлення 4 %-м розчином HNO_3 у спирті.

Металографічний аналіз виконували за допомогою металографічного мікроскопа типу Neophot 21 та електронного мікроскопа РЕМ-106і. Твердість зразків основного металу визначали за методом Бринелля на твердомірі типу ТШ-2, а наплавлених шарів – за методом Роквелла на приладі типу ТК-14-250.

Отримані результати та їх аналіз. Проведений аналіз роботи сегментів у процесі подрібнення лакофарбових складових показав, що значний рівень зношування робочих поверхонь досягається в контакті з бісерними абразивними елементами, що переміщуються в потоці технологічної суспензії. Окрім цього, на зношеній поверхні були помічені раковини та пористість (рис. 1, б), які є характерними ознаками кавітаційного впливу. Зважаючи на складний, комбінований механізм зносу, для відновлення робочих поверхонь були обрані порошкові дроти різних систем легування, що здатні забезпечити підвищену опірність до наведених впливів. Типові характеристики наплавленого обраними марками дрітів металу за даними виробників наведено в табл. 1 (зазначаються зазвичай для металу, який наплавляється у водоохолоджуваній мідній кристалізатор, тобто для випадку, коли виключається підплавлення основи, або для 3–4-го шару, якщо не вказано інше [13–15]).

Таблиця 1. Типові хімічний склад і твердість металу, наплавленого порошковими дрітами (за даними виробників)

Марка дроту	Типовий хімічний склад наплавленого металу, мас. %							Твердість наплавленого металу, HRC
	C	Mn	Si	Cr	Nb	Ni	інші	
SK A43-O	5,6	0,2	1,3	20,2	6,7	–	–	64
ВЕЛТЕК Н-590	0,5	0,5	2,6	8,5	–	–	–	55...61
ВЕЛТЕК Н-290	0,1	0,6	0,5	0,5	–	0,3	0,5 Mo	22...37
Supershield CrC	4,8	1,6	0,4	27,0	–	–	–	54...58

Вибір наплавних матеріалів із суттєво відмінним фазовим складом і фізико-механічними характеристиками зумовлений необхідністю пошуку ефективної стратегії протидії комбінованому руйнуванню та визначення ролі кожної з його складових.

Відомо, що вуглець є одним із головних компонентів зносостійких сплавів. Наприклад, з підвищенням вмісту вуглецю у сталях їхній опір зношуванню зростає, проте вже за значних величин (вище 0,8 %) сітка карбідів, що утворюється, призводить до зниження зносостійкості.

На основі цього вибір для наплавлення дротів марок SK A43-O та Supershield CrC спрямований на створення «карбідного каркасу» з високою об'ємною часткою спеціальних карбідів хрому та ніобію. Це повинно забезпечити максимальний опір мікрорізанню та прямому абразивному впливу бісеру. З іншої сторони, для зменшення впливу кавітаційної складової запропоновано використовувати дріт марки ВЕЛТЕК Н-290, який у наплавленому шарі може сформувати відносно пластичну ферито-перлітну матрицю, зміцнену дисперсними вторинними карбідами. Така структура здатна ефективно дисипувати (розсіювати) енергію кавітаційних мікроударів і динамічних навантажень від бісеру, що запобігає викрихчуванню твердої фази та сповільнює розвиток мікротріщин.

Для оцінки реального стану металу, сформованого в умовах відновлення деталей із чавуну ЧХ1, було проведено дослідження фактичного хімічного складу. На відміну від типових даних виробників (табл. 1), у табл. 2 наведено результати експериментальних досліджень, де визначення хімічного складу проводилося у верхній частині другого наплавленого шару (на відстані 1,5...2,0 мм від поверхні) після механічного зачищення.

Порівняльний аналіз даних табл. 1 та 2 вказує на суттєву зміну складу наплавленого металу порівняно з паспортними даними дротів. Зокрема для високолегованих дротів SK A43-O та Supershield CrC спостерігається зниження концентрації вуглецю та хрому в наплавленому шарі порівняно з типовими значеннями. Наприклад, вміст хрому в наплавленні дротом Supershield CrC зменшився з

типових 27 % до фактичних 19,22 %, а вуглецю – з 4,8 до 4,24 %. Відповідно, твердість цих шарів виявилася на рівні 57...60 HRC, що дещо нижче за заявлені виробником максимальні значення.

Зворотною є тенденція для дроту ВЕЛТЕК Н-290: при типовому вмісті вуглецю 0,1 %, фактичний показник у наплавленому металі зріс до 0,69 %, що супроводжувалося підвищенням твердості до 30...32 HRC.

Зазначені відхилення пояснюються інтенсивним перемішуванням наплавленого металу з основою (сірим чавуном ЧХ1) у процесі дугового наплавлення. Оскільки основний метал містить значну кількість вуглецю (3,1 %) та порівняно низьку частку легуючих елементів, відбувається дифузійне насичення або «розбавлення» сплаву, що наплавляється, елементами основи та, навпаки, дифузійне насичення вуглецем низьколегованого шару ВЕЛТЕК Н-290, що безпосередньо впливає на його підсумкову твердість і фазовий склад. Наведене підтверджується мікроструктурними дослідженнями.

У вихідному стані чавун марки ЧХ1 має ферито-перлітну основу (рис. 2).

Мікроструктура основи є нерівномірною та складається з пластинчастого перліту та фериту. Дисперсність перліту в структурі може відповідати ПД1,0 та ПД1,4 за шкалою 8.

Висока якість при відновленні поверхонь, які працюють за значних абразивних впливів, забезпечується порошковим дротом марки SK A43-O [2, 17]. Наплавлені шари такого сплаву зберігають

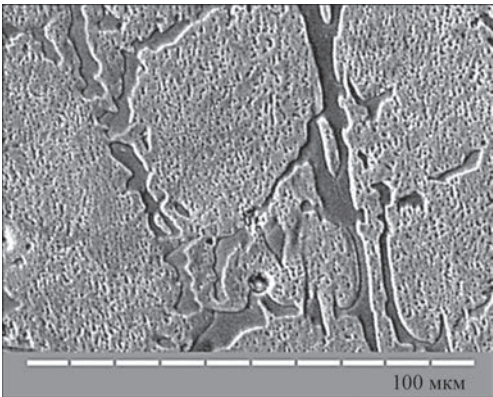


Рис. 2. Мікроструктура чавуну ЧХ1, ×500

Таблиця 2. Фактичний хімічний склад і твердість основного та наплавленого металу (експериментальні дані)

Назва зразка	Хімічний склад наплавленого металу, мас. %								Твердість, HRC
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	інші	
Основний метал, чавун ЧХ1	3,1	0,44	2,79	0,096	0,093	0,55	0,24	0,06Cu	20...22
Наплавлення, SK-A43-O	4,80	0,354	1,96	0,028	0,013	15,77	0,128	6,53Nb 0,06Cu	58...60
Наплавлення, ВЕЛТЕК Н-590	0,93	0,437	3,0	0,038	0,030	6,99	0,08	0,02Cu	54...57
Наплавлення, ВЕЛТЕК Н-290	0,69	0,462	0,75	0,028	0,030	0,57	0,260	0,32Mo 0,02Cu	30...32
Наплавлення, Supershield CrC	4,24	1,385	0,68	0,026	0,017	19,22	0,105	0,06Cu	54...56

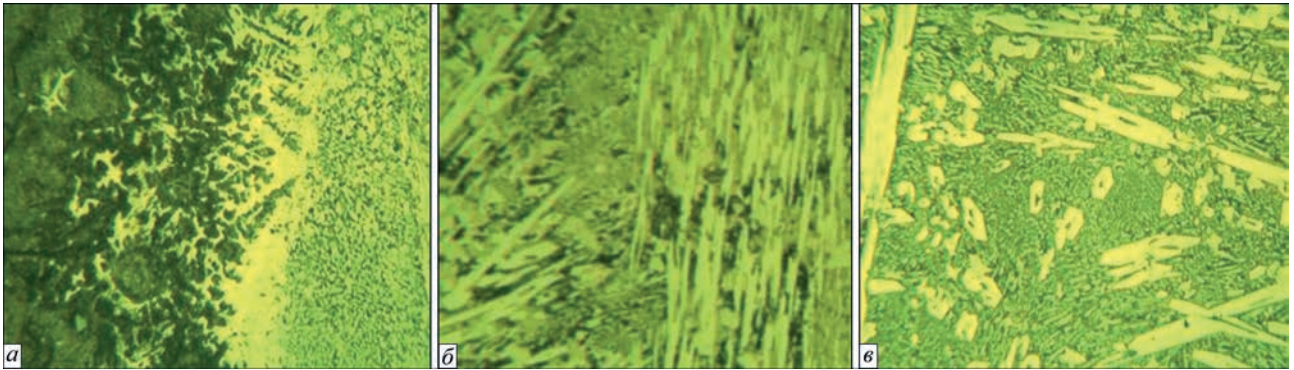


Рис. 3. Мікроструктура наплавлених шарів порошковим дротом марки SK A43-O: *а* – зона сплавлення першого шару з основним металом, $\times 400$; *б* – зона сплавлення між першим і другим шаром, $\times 500$; *в* – другого шару, $\times 500$

свої механічні властивості при робочих температурах до 450 °С. У межах даної роботи проводилося наплавлення зношеної поверхні двома шарами заввишки до 4 мм кожен. Мікроструктуру металу, напавленого порошковим дротом марки SK A43-O, показано на рис. 3.

Метал у зоні сплавлення першого шару з основою, першого з другим та другого шару щільний, без дефектів (рис. 3). Структурні складові напавленого металу ідентифікувалися за морфологічними ознаками. Мікроструктура металу нижнього шару складається з аустеніто-хромистокарбідної евтектики, різно-орієнтованих тригональних карбідів хрому, карбідів ніобію (рис. 3, *а*, *б*). Крім того, спостерігається розпад аустеніту основи. Метал верхнього шару за фазовим складом подібний до нижнього: він містить карбіди хрому аналогічної конфігурації в аустенітній основі, евтектику та карбіди ніобію (рис. 3, *в*). Скупчення останніх у верхньому шарі є більш виразними, тоді як у нижньому їх розподіл рівномірний і дисперсний. Скупчення карбідів ніобію у верхньому шарі більш виразні, у нижньому їхній розподіл більш рівномірний, дисперсний.

До особливостей отриманих шарів також можна віднести прогнозованість структури сплаву, яка складається з аустенітної матриці та карбідів ніобію, чим пояснюється високе значення твердості.

Мікроструктуру шарів, напавлених порошковим дротом марки ВЕЛТЕК Н-590, показано на рис. 4.

Сплав металу напавлення між шарами та з металом основи щільний (рис. 4). Мікроструктура металу нижнього шару є неоднорідною та складається з дендритів зі структурами розпаду аустеніту й розірваної карбідної сітки, яка розташована поміж дендритним простором, аустеніту, троститу та мартенситу (рис. 4, *а*, *б*). Мікроструктура металу верхнього шару складається з мартенситу, залишкового аустеніту, троститу та сорбіту (рис. 4, *в*). Крім того, біля поверхні напавлення в мікроструктурі спостерігається розірвана карбідна сітка.

Застосування дроту ВЕЛТЕК Н-290 забезпечило формування структури, фазовий склад якої змінюється від ледебуритної з компактними вкрапленнями карбідів хрому зі сторони зони сплавлення до ферито-перлітної з тими ж карбідами у вигляді різно-орієнтованих подовжених променів просторової зірки у зовнішньому шарі нанесеного металу (рис. 5).

Слід зазначити високу дисперсність виділень карбідів хрому, які досить рівномірно розподілені поблизу зони сплавлення (рис. 5, *а*), що спричинено значними швидкостями охолодження та обмеженим часом для зростання структурних складових на стадії твердіння розплаву. При віддаленні від лінії сплавлення на 1,2 мм (рис. 5, *б*) фіксується збільшення у 5...6 разів розмірів і кількості карбідних включень.

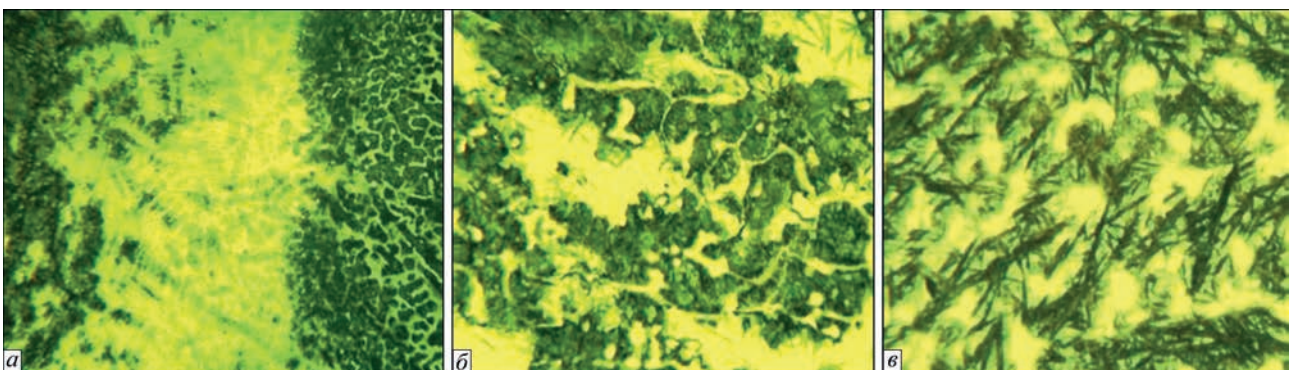


Рис. 4. Мікроструктура шарів, напавлених порошковим дротом марки ВЕЛТЕК Н-590: *а* – зона сплавлення першого шару з основним металом, $\times 600$; *б* – зона сплавлення між першим і другим шаром, $\times 800$; *в* – другого шару, $\times 800$

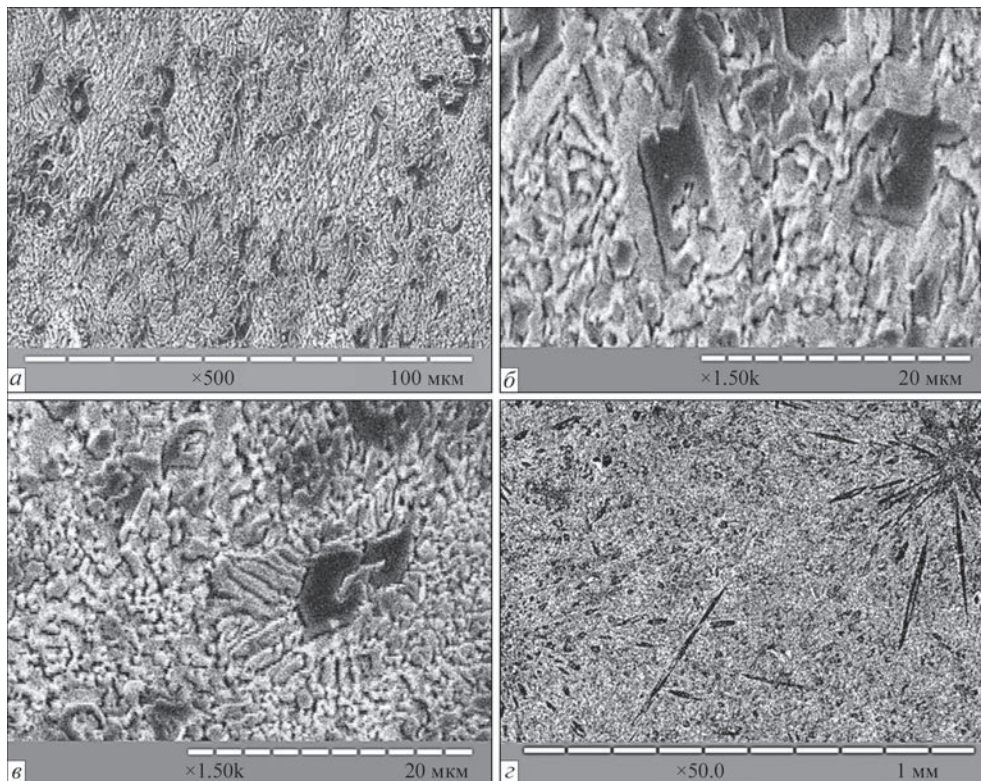


Рис. 5. Мікроструктура шарів, наплавлених порошковим дротом марки ВЕЛТЕК Н-290: *а* – на відстані 0,6 мм від лінії сплавлення першого шару з основним металом; *б* – те ж, на відстані 1,2 мм; *в* – на відстані 2,1 мм від поверхні другого шару; *г* – те ж, на відстані 1,4 мм

Навколо карбідів сформовано оторочку. Беручи до уваги вміст вуглецю, а також прискорені швидкості охолодження, що є характерними при дуговому зварюванні та напавленні, карбіди зароджуються ще у рідкому аустеніті. На етапі первинної кристалізації у високотемпературній області (1800...2000 °С) розміри карбідів збільшуються. У процесі подальшого охолодження в найближчому оточенні аустеніту – через зменшувану дифузійну рухливість вуглецю – формуються нові дрібні карбіди. Подібні структури (дрібні частки твердої фази в матриці більш пластичної фази) не підлягають руйнуванню без попередньої пластичної деформації, що поглинає енергію статичних і ударних навантажень. Аустеніт, що знаходиться за межами дифузійної зони, поступово перетворюється на ледебурит.

Аналіз отриманих мікроструктур (рис. 5) показує, що сформована навколо карбідів пластична оторочка зі зменшеним вмістом вуглецю виконує роль демпфуючого прошарку. Це підтверджується відсутністю мікротріщин та осередків руйнування у досліджених зразках, на відміну від крихких високовуглецевих структур. Така морфологія забезпечує релаксацію пікових статичних та ударних навантажень на межі «карбід–матриця», що підвищує загальну тріщиностійкість напавленого металу та запобігає його передчасному викривченню в умовах динамічного впливу бісеру.

Ймовірно, що присутність у розчині молібдену може сприяти збільшенню кількості осередків для формування цементитних карбідів. При подальшому віддаленні від лінії сплавлення, завдяки збільшенню тривалості знаходження металу в рідкому стані, карбіди набувають подовженої форми більшого розміру, з довільною орієнтацією в об'ємі. З наближенням до поверхні фіксуються тонкі різноорієнтовані карбіди та частково компактні, які за розмірами не менше ніж у двічі поступаються розташованим поблизу зони сплавлення (рис. 5, *в*, *г*).

При детальному розгляді середньої частини нанесеного шару виявляється віялоподібна форма фіксації феритно-перлітної суміші, ймовірно під

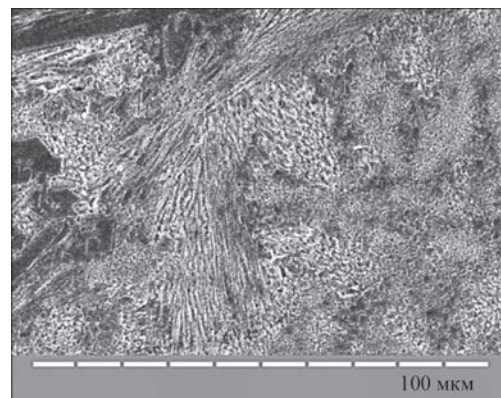


Рис. 6. Мікроструктура шарів, наплавлених порошковим дротом марки ВЕЛТЕК Н-290, на відстані 2,1 мм від поверхні другого шару, $\times 500$

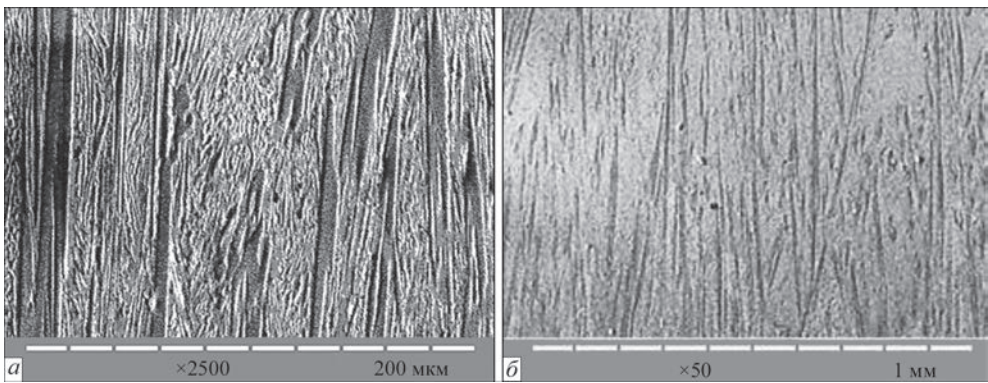


Рис. 7. Мікроструктура шарів, наплавлених порошковим дротом марки Supershield CrC: *а* – на відстані 0,6 мм від лінії сплавлення першого шару з основним металом; *б* – на відстані 1,0 мм від поверхні другого шару

Таблиця 3. Втрата маси Δm сегментами після однакового терміну експлуатації

Марка застосованого дроту	Твердість наплавленого шару, <i>HRC</i>	Δm , г, при орієнтуванні валиків	
		по колу	по радіусу
SK A43-O	58...60	112	76
ВЕЛТЕК Н-590	54...57	123	81
ВЕЛТЕК Н-290	30...32	186	104
Supershield CrC	54...56	110	77,5

впливом дії електромагнітних і динамічних сил рухомого дугового джерела нагріву (рис. 6).

Шар, що виконувався з використанням дроту Supershield CrC, має характерну для заевтектичного чавуну цементитно-ледебуритну структуру (рис. 7). Карбіди хрому стали визначальною фазою при первинній кристалізації. Залишковий аустеніт у процесі подальшого охолодження перетворився на ледебурит за відомим механізмом. Карбіди хрому, які мають сильно подовжену форму, орієнтовані перпендикулярно до лінії сплавлення.

Незважаючи на зміни, що характеризують наплавлений на зразки з чавуну ЧХ1 обраними дротами метал, сформована мікроструктура отриманих шарів (рис. 3–7) фактично відповідає обраним стратегіям захисту, забезпечуючи або жорсткий карбідний каркас, або пластичну матрицю, що дозволяє детально дослідити їхню поведінку в умовах експлуатації.

Сегменти, відновлені із застосуванням розглянутих порошкових дротів, були встановлені до млинів для продовження експлуатації в умовах ТОВ «ЗІП». Як впливає з проведених замірів маси сегментів після їхньої роботи впродовж 219 год (у період 10.04. – 17.09.2025, між черговими перевалками), пропорційної залежності між твердістю нанесених шарів і стійкістю останніх до зносу не спостерігається (табл. 3).

Дослідженню підлягала й оригінальна деталь – сегмент, який не піддавався відновленню та мав знос, що не перевищував критичних значень на момент перевалки. Втрата маси Δm оригінального сегмента склала 237 г. Найкращу зносостійкість (мінімальна втрата маси) продемонстрували зразки, наплавлені дротами SK A43-O та Supershield CrC при орієнтації «по радіусу», незважаючи на те, що їхня фактична твердість (табл. 2) нижча за типову (табл. 1). Це підтверджує, що при комбінованому зносі вирішальну роль відіграє мікроструктура – зокрема, об’ємна частка, тип і дисперсність твердих карбідних фаз (NbC та CrC), які ефективно протистоять абразивному впливу.

Слід акцентувати, що на втрату маси Δm відновлених сегментів також відчутний вплив чинить орієнтування валиків (рис. 8): накладання їх по колу, тобто перпендикулярно до вектора руйнування мета-

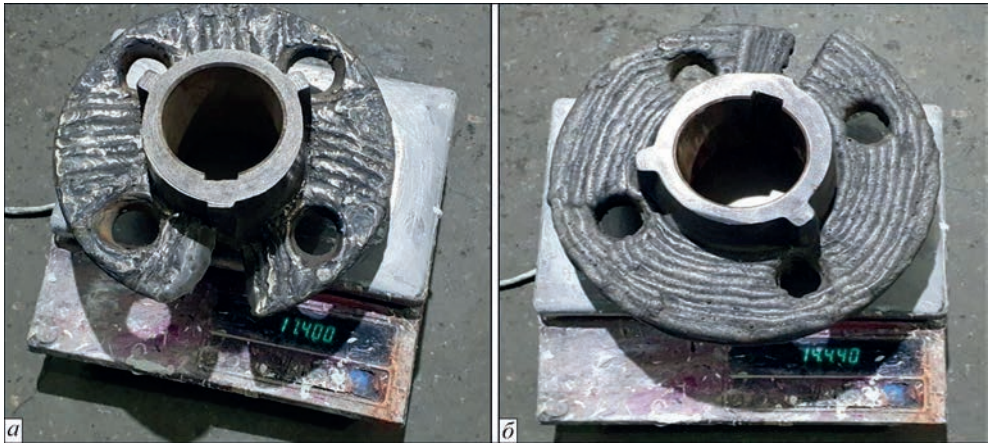


Рис. 8. Відновлені сегменти з різною орієнтацією валиків: *а* – по радіусу; *б* – по колу

лу та напрямку хвильового профілю, що формується під час зношування, спричиняє більше руйнування поверхневого шару (відновлена поверхня після наплавлення механічній обробці не піддавалася).

Комплексний аналіз отриманих результатів дозволив сформувавши раціональну технологію відновлення та зміцнення сегментів, що містить наступну послідовність операцій: механічне очищення робочих поверхонь, попередній підігрів до 400...450 °С, двошарове дугове наплавлення за визначеними режимами. З огляду на експлуатаційні показники (табл. 3), найдоцільнішим елементом цієї технології є застосування порошкового дроту марки ВЕЛТЕК Н-590 з радіальною орієнтацією наплавочних валиків. Таке рішення є економічно обґрунтованим через помірне легування матеріалу та забезпечує майже триразове підвищення зносостійкості порівняно з оригінальними деталями.

Висновки

1. Розроблено раціональну технологію відновного наплавлення сегментів черв'ячного валу бісерного млина, яка базується на використанні порошкових дрітків, що формують у нанесених шарах жорсткий карбідний каркас або пластичну матрицю для протидії комбінованому зносу. Ключовим параметром технології, який визначає ресурс деталі, є радіальна орієнтація валиків (перпендикулярно до напрямку формування хвильового профілю зносу), що мінімізує ерозійне вимивання металу вздовж міжваликових зон.

2. Експериментально підтверджено, що застосування розробленої технології з використанням порошкового дроту ВЕЛТЕК Н-590 забезпечує зниження втрати маси відновленого сегмента майже у 3 рази в порівнянні зі зносом нової деталі впродовж аналогічного терміну експлуатації. Це дозволяє рекомендувати дану марку дроту як раціональну за співвідношенням «вартість–зносостійкість».

3. На основі металографічного аналізу встановлено, що комплексне легування елементами-карбідоутворювачами (Cr, Nb, Mo) забезпечує гетерогенне зародження фаз із різною термодинамічною стабільністю. Це призводить до значного рафінування (подрібнення) структури та формування різно-орієнтованих карбідних скупчень у вигляді просторових зірок і віялоподібних включень, що підвищує загальну стійкість шару до направленого динамічного впливу абразиву.

4. Встановлено, що при зниженій концентрації вуглецю в наплавленому металі навколо карбідних включень формуються пластичні оторочки – знеуглецьовані зони, зміцнені дисперсними вторинними карбідами. Зафіксована відсутність

мікротріщин та осередків викришування у таких структурах доводить їхню здатність релаксувати пікові напруження та блокувати розвиток руйнування при значних контактних навантаженнях.

Список літератури

1. Tanaka, H., Ochii, Y., Moroto, Y., Ibaraki, T., Ogawara, K. (2021) Development of novel bead milling technology with less metal contamination by pH optimization of the suspension medium. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 69(1), 81–85. DOI: <https://doi.org/10.1248/cpb.c20-00623>
2. Герасимов В.В., Плітченко С.О., Перемітько В.В., Матяж І.О. (2024) Особливості зносу та перспективи відновлення сегмента черв'ячного шнека бісерного млина. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*, 1(44), 65–72. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.44.2024.8>
3. Рябцев И.А., Сенченков И.К. (2013) *Теория и практика наплавочных работ*. Київ, Екотехнологія.
4. Dametew, A.W. (2015) Experimental investigation on weld ability of cast iron. *Science Discovery*, 3(6), 71–75. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.sd.20150306.15>
5. Брыков М.Н., Ефременко В.Г., Ефременко А.В. (2014) *Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании: Научное издание*. Херсон, Гринь Д.С.
6. Correa, E.O., Alcántara, N.G., Tecco, D.G., Kumar, R.V. (2007) The relationship between the microstructure and abrasive resistance of a hardfacing alloy in the Fe-Cr-C-Nb-V system. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 38, 1671–1680. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9220-8>
7. Colaço, F.H.G., Souto, A.H.R., Stryhalski, J., et al. (2023) Dry sliding wear resistance of Fe-Cr-C hardfacing deposited by flux-core-double-wire GTAW. *Materials Research*, 26, e20220600. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0600>
8. Balos, S., Labus, Zlatanović D., Janjatović, P. et al. (2025) Microstructure, hardness, and wear behavior of layers obtained by electric arc hardfacing processes. *Materials*, 18(2), 299. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18020299>
9. Ngo, H.K.L., Yamamoto, K., Okuyama, T. et al. (2025) Influence of heat treatment on erosive wear resistance of high Cr cast irons. *International J. of Metalcasting*, 19, 1281–1294. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40962-024-01446-x>
10. Федоров Г.С., Ямшинський М.М., Платонов С.О., Кузьменко А.Ю., Радченко К.С. (2009) Підвищення гідроабразивної зносостійкості високолегованого білого чавуну. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, 1, 95–99.
11. Luo, C., Gu, J. (2023) Surface properties and cavitation erosion resistance of cast iron subjected to laser cavitation treatment. *Metals*, 13(10), 1793. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13101793>
12. Перемітько В.В., Носов Д.Г., Сухомлин В.І., Коломосьць І.В. (2025) *Наплавлений метал: керування складом, будовою та властивостями: монографія*. Кам'янське, ДДТУ.
13. https://prompostavka.in.ua/ua/p1915023875-samozaschitnaya-poroshkovaya-provoloka.html?srsltid=AfmBOorzJINb5k9OtqH0ehY1OFUUigD3g9QxZUnpesM51-https://weldtech-group.com/eng/WELTEC_H590https://weldtech-group.com/eng/WELTEC_H290https://arcweldingservice.com/content/file/product/0618201592453211.pdf
14. https://weldtech-group.com/eng/WELTEC_H590
15. https://weldtech-group.com/eng/WELTEC_H290
16. <https://arcweldingservice.com/content/file/product/0618201592453211.pdf>
17. Peremitko, V.V., Plitchenko, S.O., Herasimov, V.V., Yermak, D.A., Ocheretko, S.O. (2025) Features of wear and restoration of worm screw segments in a bead mill. *Тези доп. конф. «Зварювання та споріднені технології для відновлення України»*, 27 листопада 2025, Київ, с. 92.

References

1. Tanaka, H., Ochii, Y., Moroto, Y., Ibaraki, T., Ogawara, K. (2021) Development of novel bead milling technology with less metal contamination by pH optimization of the suspension medium. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 69(1), 81–85. DOI: <https://doi.org/10.1248/cpb.c20-00623>

2. Herasimov, V.V., Plitchenko, S.O., Peremitko, V.V., Matyazh, I.O. (2024) Features of wear and prospects for restoration of the worn auger segment of a bead mill. *Zbirnyk Naukovykh Prats Dniprovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu (Tekhnichni Nauky)*, 1(44), 65–72 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.44.2024.8>
3. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing works*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian].
4. Dametew, A.W. (2015) Experimental investigation on weld ability of cast iron. *Science Discovery*, 3(6), 71–75. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.sd.20150306.15>
5. Brykov, M.N., Efremenko, V.G., Efremenko, A.V. (2014) *Wear resistance of steels and cast irons under abrasive wear: Scientific publication*. Kherson, Grin D.S. [in Russian].
6. Correa, E.O., Alcântara, N.G., Tecco, D.G., Kumar, R.V. (2007) The relationship between the microstructure and abrasive resistance of a hardfacing alloy in the Fe-Cr-C-Nb-V system. *Metallurgical and Materials Transact. A*, 38, 1671–1680. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9220-8>
7. Colaço, F.H.G., Souto, A.H.R., Stryhalski, J. et al. (2023) Dry sliding wear resistance of Fe-Cr-C hardfacing deposited by flux-core-double-wire GTAW. *Materials Research*, 26, e20220600. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0600>
8. Balos, S., Labus, Z., Zlatanović D., Janjatović, P. et al. (2025) Microstructure, hardness, and wear behavior of layers obtained by electric arc hardfacing processes. *Materials*, 18(2), 299. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18020299>
9. Ngo, H.K.L., Yamamoto, K., Okuyama, T. et al. (2025) Influence of heat treatment on erosive wear resistance of high Cr cast irons. *Intern. J. of Metalcasting*, 19, 1281–1294. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40962-024-01446-x>
10. Fedorov, G.E., Yamshynskiy, M.M., Platonov, E.O., Kuzmenko, A.Yu., Radchenko, K.S. (2009) Increasing the hydro-abrasive wear resistance of high-alloy white cast iron. *Naukovi Visti NTUU KPI*, 1, 95–99 [in Ukrainian].
11. Luo, C., Gu, J. (2023) Surface properties and cavitation erosion resistance of cast iron subjected to laser cavitation treatment. *Metals*, 13(10), 1793. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13101793>
12. Peremitko, V.V., Nosov, D.G., Sukhomlyn, V.I., Kolomojets, I.V. (2025) *Deposited metal: control of composition, structure and properties: Monograph*. Kamianske, DDTU [in Ukrainian].
13. <https://prompostavka.in.ua/ua/p1915023875-samozaschitnaya-poroshkovaya-provoloka.html?srsltid=AfmBOorzJINb5k9OtqH0ehY1OFUUigD3g9QxZUnpesM51->
14. https://weldtech-group.com/eng/WELTEC_H590
15. https://weldtech-group.com/eng/WELTEC_H290
16. <https://arcweldingservice.com/content/file/product/0618201592453211.pdf>
17. Peremitko, V.V., Plitchenko, S.O., Herasimov, V.V., Yermak, D.A., Ocheretko, S.O. (2025) Features of wear and restoration of worm screw segments in a bead mill. In: *Abstracts of papers of Conf. on Welding and Related Technologies for the Restoration of Ukraine*. Kyiv, Nov. 27, 2025. Ed. by O.T. Zelnichenko. Kyiv, PWI Publishing House, 92 [in Ukrainian].

ARC SURFACING OF BEAD MILL SCREW SEGMENTS

V.V. Peremitko, S.O. Plitchenko, V.V. Gerasimov, V.I. Sukhomlyn, O.S. Ocheretko

Dniprovsky State Technical University, 2 Dniprobudivs'ka Str., 251918, Kamianske, Ukraine. E-mail: vperemitko@dstu.dp.ua

The research is aimed at developing a rational technology for restoring worn-out sections of the working surfaces of MT-140 bead mill screw segments and increasing their operational life. Worn segments made of ChKh1 grade gray chromium cast iron served as the research material. For restoration, the technology of arc hardfacing with flux-cored wires of SK A43-O, VELTEK N-590, VELTEK N-290, and Supershield CrC grades was applied. Hardfacing was performed in two layers with different bead orientations using a Lorch Micormig 350A semi-automatic welding machine at $I = 200$ A and $U = 30$ V, with pre-heating to 400...450 °C. The best wear resistance values are demonstrated by high-alloy wires SK A43-O and Supershield CrC due to the formation of a significant fraction of hard chromium and niobium carbides. It was confirmed that no proportional relationship between the hardness of the hardfaced layers and their wear resistance is observed. It has been established that the orientation of the surfacing rollers along the segment radius affects the wear intensity of the working surface of the part. For the restorative surfacing of segments, it is proposed to use flux-cored wires, which ensure the formation of either a hard carbide framework or a plastic matrix in the deposited layers, which are capable of providing increased resistance to combined cavitation and hydroabrasive impact. 17 Ref., 3 Tabl., 8 Fig.

Keywords: bead mill, segments, ChKh1 cast iron, hydroabrasive and cavitation wear, recovery, flux cored wires, carbide frame, plastic matrix, mass loss

ORCID

Перемітько В.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9032-6116>, Плітченко С.О. – <https://orcid.org/0000-0002-0613-2544>,

Герасімов В.В. – <https://orcid.org/0009-0007-0391-7200>, Сухомлин В.І. – <https://orcid.org/0000-0002-3673-1353>,

Очеретко О.С. – <https://orcid.org/0009-0008-1837-3768>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

В.В. Перемітько

Дніпровський державний технічний університет. 51918, м. Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2.

E-mail: vperemitko@dstu.dp.ua

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

В.В. Перемітько, С.О. Плітченко, В.В. Герасімов, В.І. Сухомлин, О.С. Очеретко (2026) Дуговое наплавления черв'ячного шнека бісерного млина. *Автоматичне зварювання*, 03, 34–41. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.03.05>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

Отримано 15.12.2025

Отримано у переглянутому вигляді 09.03.2026

Підписано до друку 14.05.2026

Оприлюднено 20.05.2026