

4. Ігнатов А.О. Перспективи застосування гнучкої колони бурильних труб для буріння свердловин // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент - техника и технология его изготовления и применения. – 2018, Вып. 21. – С. 132 – 139.
5. Патент на винахід № 114966 Україна МПК E21B 19/08 (2006.01). Пристрій для створення осевого навантаження / А.О. Ігнатов. – Опубл. 10.05.17, Бюл. № 9.

Надійшла 01.07.19

### References

1. Kalinin, A. G., Oshkordin, O. V., Pitserskiy V. M. et al. (2000). *Razvedochnoe burenie [Prospecting boring drilling]*. Moscow: Nedra – Biznestsentr [in Russian].
2. Vainshtok, S. M., Molchanov, A. G., Nekrasov, V. I. et al. (1999). *Podzemnyi remont i burenie skvazhin s primeneniem gibkikh trub [Underground repair and well-drilling with the use of coiled tubing]*. Moscow: Academy of mining sciences [in Russian].
3. Davidenko, A. N., & Ihnatov, A. A. (2013). *Abrazivno-mekhanicheskoe udarnoe burenie skvazhin [Abrasive-mechanical blowing well-drilling]*. Dnipropetrovsk: NMU [in Russian].
4. Ihnatov, A. O. (2018). *Perspektyvy zastosuvannia hnuchkoi kolony burylnykh trub dlia burinnia sverdlovyn [Perspectives application of coiled tubing in bore holes]. Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiia ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools-Techniques and Technology of the Tool Production and Applications, Vol. 21, 132 – 139.*
5. Ihnatov, A. O. (2017). Patent of Ukraine 114966.

УДК 622.248.33

DOI: 10.33839/2223-3938-2019-22-1-133-148

**М. М. Студент**, д-р техн. наук<sup>1</sup>, **Г. В. Похмурська**, д-р техн. наук<sup>2</sup>, **А. К. Судаков**, д-р техн. наук<sup>3</sup>, **А. Р. Дзюбик**, **А. А. Войтович**, кандидати техн. наук<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, 79060, м. Львів, E-mail: [muhajlo@ipm.lviv.ua](mailto:muhajlo@ipm.lviv.ua)

<sup>2</sup>Національний університет “Львівська політехніка” вул. Степана Бандери, 12, 79013, м. Львів, E-mail: [zvdv.dept@lpnu.ua](mailto:zvdv.dept@lpnu.ua)

<sup>3</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпр, E-mail: [sudakovy@ukr.net](mailto:sudakovy@ukr.net)

## МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШАРІВ, НАПЛАВЛЕНИХ ЗА ДІЇ МЕХАНІЧНОЇ ВІБРАЦІЇ ДЕТАЛЕЙ

Вперше встановлено закономірності впливу напрямку та амплітуди механічної вібрації підкладки на структурно-фазовий склад, морфологію та розміри зміцнювальних включень у структурі шарів, наплавлених економнолегованими порошковими дротами (ПД) системи Fe-Cr-B-C під шаром флюсу. Встановлено, що механічна вібрація змінює фазовий склад наплавленого шару, кількість фази FeCrB зменшується, а фази FeCr<sub>2</sub>B зростає. Оптимізовано параметри вібрації підкладки під час наплавлення її поверхні для модифікації структури наплавленого металу і досягнення максимальної зносостійкості.

Вперше запропоновано подрібнювати боридні включення в структурі наплавлених шарів шляхом додавання до складу шихти ПД системи Fe-Cr-B-C порошку ПАМ (60 % Al 40 % Mg). Встановлено, що після додавання 1 мас. % порошку диспергування зміцнювальної боридної фази збільшується у 7 разів.

Вперше встановлено, що за наявності в шихті ПД 80X20P3T порошку ПАМ в структурі наплавленого шару виділяються дрібнодисперсні (до 1 мкм) включення складнолегованих нітридів, які відчутно підвищують мікротвердість (в 1,2 рази) і, відповідно, зносостійкість (у 1,5 рази) наплавлених

шарів.

За результатами виконаних досліджень рекомендовано використовувати для відновлення деталей машин механічну вібрацію під час наплавлення. Тоді збільшується кількість центрів кристалізації у зварювальній ванні, що сприяє подрібненню структури, зокрема боридів, і перерозподілу фаз. Такі зміни мікроструктури в 2,5 рази підвищують зносостійкість металу, наплавленого ПД системи Fe–Cr–B–C.

Великогабаритні деталі, для яких важко реалізувати механічну вібрацію під час наплавлення, запропоновано наплавляти ПД 80X20P3T, додатково легованим 1 мас. % порошку ПАМ. Внаслідок цього довговічність наплавленого металу за ударних навантажень зросла у 1,5 рази порівняно з шаром, отриманим з ПД базового складу.

**Ключові слова:** порошкові дроти, абразивна зносостійкість, наплавлені шари, мікроструктура, боридні включення

Мета роботи – підвищити зносостійкість наплавлених шарів з використанням економнолегованих ПД системи Fe–Cr–B–C шляхом подрібнення включень боридів в їх структурі під дією вібрації під час наплавлення та додавання до шихти ПД порошку алюміній-магнієвої лігатури (ПАМ), щоб збільшити довговічність нових та відновлених елементів устаткування (зокрема, обладнання ТЕС).

Зносостійкі шари наплавляли на підкладку 300×150 мм зі сталі Ст3сп, застосувавши серійну автоматичну головку АБС. Мікроструктуру наплавленого металу досліджували на електронному мікроскопі EVO 40 XVP. Вміст елементів у наплавленому металі встановлено за допомогою детектора INCA, фазовий склад на приладі DISCOVERY 7. Про розміри боридних включень судили за їх середнім розміром, який визначили за допомогою програмного забезпечення Axio Vision. Зносостійкість наплавленого металу оцінювали за відомими методиками визначення зносу за випробувань закріпленим і незакріпленим абразивом, а для оцінювання зносу наплавленого металу за ударного навантаження створено спеціальне устаткування. Мікромеханічні характеристики наплавленого металу визначали методами динамічного індентування та склерометрії. Пошкодженість поверхні після ударних випробувань наплавленого шару оцінено за її фрактографічними ознаками.

Абразивне зношування за ударних навантажень вважають одним із найпоширеніших видів зношування. За таких умов експлуатуються наприклад: буровий інструмент, робочий орган екскаватора, харчові подрібнювачі тощо. У світовій практиці для їх захисту від зношування використовують наплавлення ПД системи Fe–Cr–B–C–V–W із додаванням тугоплавких карбідів або дороговартісних елементів (ванадій, ніобій, молібден, вольфрам), а також рідкоземельних металів (церій, лантан), що сприяють подрібненню структурних складових в наплавленому металі. Внаслідок диспергування структурних складових підвищується зносостійкість металу, проте істотно зростає вартість ремонту через високу ціну витратних матеріалів.

В Україні для відновлення зношених поверхонь наплавленням широко використовують ПД системи Fe–Cr–B–C. Такі ПД мають низьку вартість, а наплавлений метал – задовільну зносостійкість. Однак основним недоліком шарів, наплавлених такими ПД, є дендрити першого та другого порядку з голкоподібною морфологією. Гострі вершини твердої фази виконують роль концентраторів напружень, від яких через ударні навантаження 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 диспергувати структурні складові в наплавленому металі завдяки наплавленню за дії механічної вібрації. Це особливо доцільно застосовувати для виготовлення наплавленням біметалевих зносостійких пластин. У випадку великогабаритних

деталей запропоновано диспергувати структурні складові в наплавленому металі шляхом модифікування шихти ПД системи Fe–Cr–В–С додаванням до неї порошку ПАМ.

Для формування наплавленого металу використано порошкові дроти (ПД) Ø 3,2 мм (рис. 1). Оболонка ПД виготовлена з низьковуглецевої сталі 08кп, заповнена порошковою шихтою на основі феросплавів.

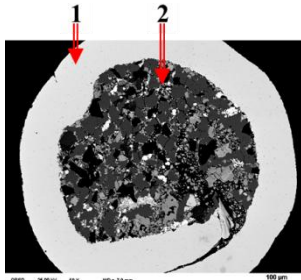


Рис. 1. Поперечний переріз ПД:  
1 – сталева оболонка; 2 – шихта.

Для дослідження обрано ПД, які у наплавленому металі мають феритну та аустенітну матрицю. Наплавлені шари на основі феритної матриці не містять перетворень структури за умов абразивного зношування та під час ударних навантажень. Хімічний склад ПД (табл. 1) містить високу кількість хрому, бору, що позитивно впливає на зносостійкість наплавленого металу, оскільки у структурі виділяються тверді боридні включення.

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

Марка ПД	С	В	Cr	Ti	Mn	Al	Mg	Si	Fe
X10P3Г2С (феритна матриця)	0,08	3,5	10,0	—	2,0	—	—	1,0	Решта
80X20P3Т (аустенітна матриця)	0,8	3,0	20,0	1,0	—	—	—		
80X20P3Т + 2 % ПАМ (аустенітна матриця)	0,8	3,0	20,0	1,0	—	1,0	0,5		

Для наплавлення металу порошковими дротами використали підвісну головку АБС та генератор ПСО 500 як джерело живлення. Для захисту від атмосферного впливу використали флюс ОСЦ 45. Наплавлений ПД шар наносили на металеву підкладку зі сталі Ст3сп, розміром 150×300 мм, двічі. Вібраційну обробку ванни розплавленого металу у зоні горіння електричної дуги здійснили за частоти коливань підкладки 100 Гц, амплітуди 0, 70, 300 мкм. Використали вертикальну і горизонтальну вібрації. Загальний вигляд устаткування показано на рис. 2.

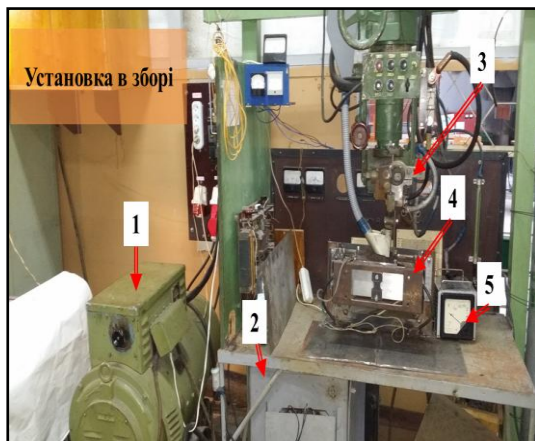


Рис. 2. Установка для наплавлення за додаткової вібрації деталі: 1 – джерело живлення генератор ПСО 500; 2 – силовий контактор; 3 – подаючий механізм ПД підвісної головки АБС; 4 – вібраційний стіл; 5 – автотрансформатор.

Мікроструктуру наплавлених шарів досліджено на поперечному мікрошліфі із використанням електронного мікроскопа EVO 40 XVP. Вимірювання твердості виконано на мікротвердомірі ПМТ-3 з масою наважки 200 г.

Зносостійкість наплавлених шарів досліджено за різних умов зношування. Абразивне зношування незакріпленим абразивом оцінювали згідно ГОСТ 23.208-79 (рис. 3, а). Просушений кварцевий 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. 3, б) використали абразивний

круг СМ-2 на керамічній зв'язці. Лінійна швидкість тертя при цьому становила 0,4 (м/с), навантаження в зоні лінійного контакту 1,5 (кН).

Ударне зношування (рис. 3, в) оцінили за сили удару 12 кДж кулькою Ø25 мм зі сталі ШХ 15, яка падала на досліджувану поверхню з частотою 40 с<sup>-1</sup>. Тривалість експерименту 3600 с. Втрату маси зразків визначали з точністю до 2×10<sup>-4</sup> г на електронних вагах. Вимірювання зносостійкості при сухому терті на повітрі та у середовищі емульсолу проведено на установці реверсивного руху при навантаженні 300 г та тривалості експерименту 2 год. Форму перерізу доріжок тертя визначено на профілометрі DEKТАК II.

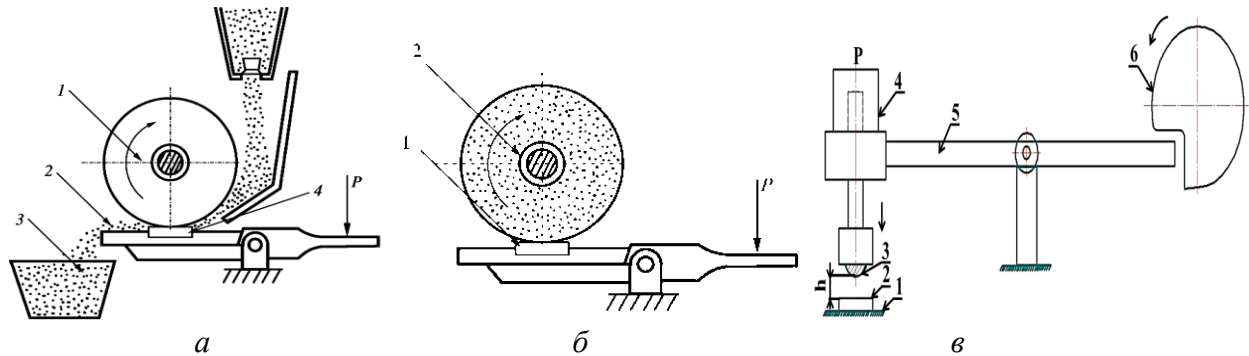


Рис. 3 Принципова схема установки.

а – для дослідження абразивного зношування: 1– гумовий диск, 2 – пісок, 3 – ємність для збирання абразиву, 4 – зразок;

б. – для дослідження зношування зразків жорстко закріпленим абразивом: 1– зразок, 2 – абразивний круг

в – для дослідження ударного зношування зразків: 1–основа, 2–зразок; 3–індентор, 4–наважка, 5–коромисло, 6–ексцентрик, h–відстань від зразка 10 мм.

З допомогою фазового аналізу встановлено, що метал, наплавлений без вібрації, складається із феритної матриці, легованої хромом, та боридних включень (FeCr)B, (FeCr)<sub>2</sub>B. Із літературних джерел відомо, що фаза (FeCr)<sub>2</sub>B містить меншу кількість хрому та бору, ніж фаза (FeCr)B і характеризується меншою твердістю, проте суттєво більшою пластичністю. Місце розташування включень (FeCr)B, (FeCr)<sub>2</sub>B у структурі наплавленого металу ідентифікували мікроспектральним аналізом на шліфах та виявили, що включення боридів типу (FeCr)B крупні за розміром та темніші за кольором, бориди типу (FeCr)<sub>2</sub>B значно дрібніші та світліші (рис. 6).

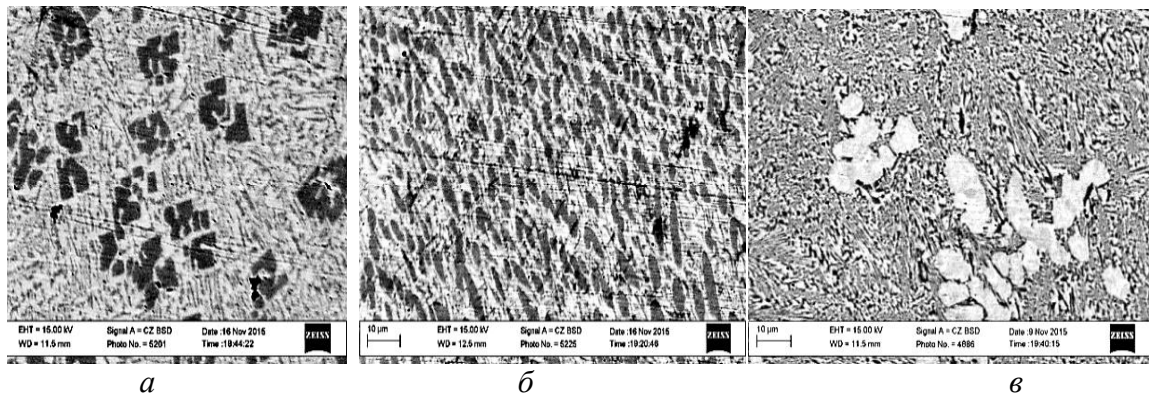


Рис. 6. Мікроструктура на гребнях валиків металу, наплавленого ПД Х10Р3Г2С без (а) та з використанням вертикальної (б) та горизонтальної (в) вібрації амплітудою 300 мкм

Встановлено, що подрібнення складових в структурі наплавленого металу залежить і від напрямку (вертикальний чи горизонтальний), і від амплітуди вібрації підкладки. Зокрема, дисперсність включень боридів  $(\text{FeCr})\text{B}$ ,  $(\text{FeCr})_2\text{B}$  зростає з підвищенням амплітуди вібрації як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках.

У наплавлених шарах, отриманих за накладання вертикальної або горизонтальної вібрації підкладки амплітудою 300 мкм, бориди  $(\text{FeCr})\text{B}$  подрібнюються і згладжується їх гострокутна морфологія (рис. 7 б, в). При цьому максимальний ефект їх диспергування виявлено за горизонтальної вібрації (рис. 7 в). Середній розмір включень боридів визначали, використовуючи програму AxioVizio. У вихідному металі з ПД Х10Р3Г2С без вібрації під час наплавлення середній розмір включень боридів  $(\text{FeCr})\text{B}$ ,  $(\text{FeCr})_2\text{B}$  у структурі на гребені валиків змінювався від 10 до 150 мкм, а в зоні їх перекривання – від 50 до 350 мкм (рис. 7 а).

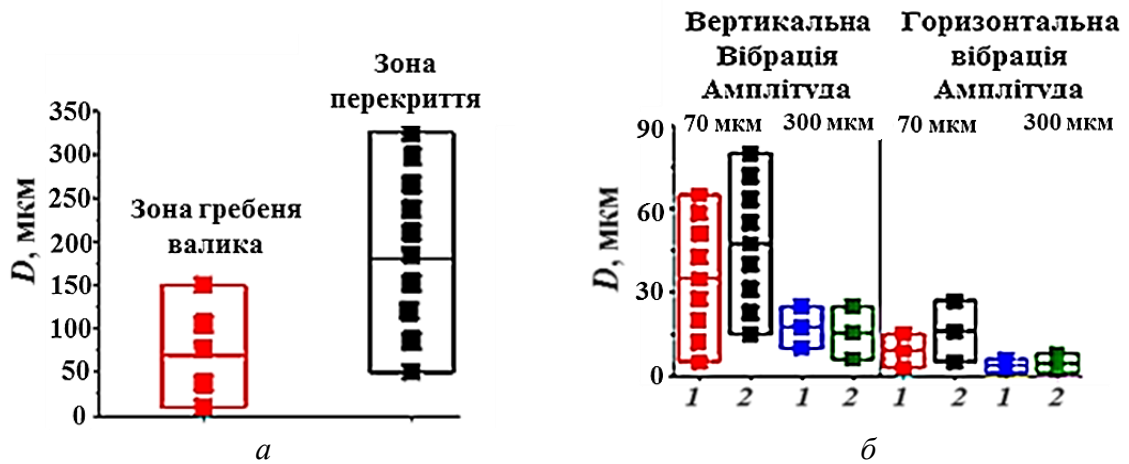


Рис. 7. Середній розмір  $D$  включень боридів у металі, наплавленому ПД Х10Р3Г2С без вібрації (а) і за вертикальної та горизонтальної вібрації (б): 1, 2 – гребінь та зона перекривання валиків

За прикладання під час наплавлення як вертикальної, так горизонтальної вібрації розкид розмірів включень боридів  $(\text{FeCr})\text{B}$ ,  $(\text{FeCr})_2\text{B}$  зменшується (рис. 8 б). Зокрема, за вертикальної вібрації амплітудою 70 мкм він зменшився у тричі, а амплітудою 300 мкм – у 6 разів порівняно з їхнім розміром у металі, наплавленому без вібрації. За горизонтальної вібрації амплітудою 70 та 300 мкм досягнуто ще сильнішого диспергування, при цьому середній розмір боридів  $(\text{FeCr})\text{B}$ ,  $(\text{FeCr})_2\text{B}$  зменшився у 10 та 18 разів відповідно. Вібрація не лише впливає на розміри та форму боридів, а і на гомогенність наплавленого металу.

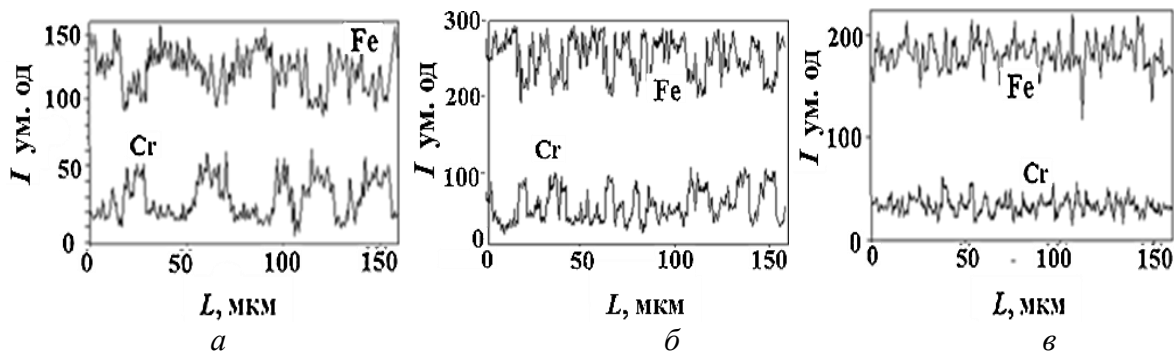


Рис. 8. Розподіл хрому та заліза на відрізку  $L$  довжиною 150 мкм у металі, наплавленому ПД Х10Р3Г2С без (а) та з використанням вертикальної (б) та горизонтальної (в) вібрації амплітудою 300 мкм

Дослідження розподілу хрому у феритній матриці металу, наплавленого з вібрацією, виявили однорідніший розподіл хрому у феритній матриці, що є ще одним доказом впливу вібрації на диспергування боридів  $(\text{FeCr})\text{B}$ ,  $(\text{FeCr})_2\text{B}$  (рис. 9 а). Ширина зони підвищеного вмісту хрому визначає розміри боридних включень, а ширина зон підвищеного вмісту заліза відповідає відстаням між боридами. Із прикладанням вертикальної вібрації амплітудою 300 мкм ширина піків зменшується, а їх густина збільшується у 2,4 рази. За горизонтальної вібрації амплітудою 300 мкм у наплавленому металі виявили найдисперсніші бориди  $(\text{FeCr})_2\text{B}$  середній розмір яких становив 5 мкм, що також підтверджено розподілом хрому. Отримані результати дають підстави стверджувати, що горизонтальна вібрація істотніше диспергує структурні складові металу, наплавленого ПД Х10Р3Г2С. Перевірено це на структурі металу, наплавленого дротом ПД 80Х20Р3Т за амплітуди коливань підкладки 70, 200 та 300 мкм. Виявлено, що і в цьому випадку структурні складові наплавленого металу (боридні включення) суттєво подрібнювалися зі зростанням амплітуди вібрації під час наплавлення (рис. 9). Зокрема, боридні включення  $(\text{FeCr})\text{B}$ ,  $(\text{FeCr})_2\text{B}$  максимально подрібнилися за вібрації амплітудою 300 мкм (рис. 9 з). Середній розмір включень при цьому 1...20 мкм (рис. 10 а).

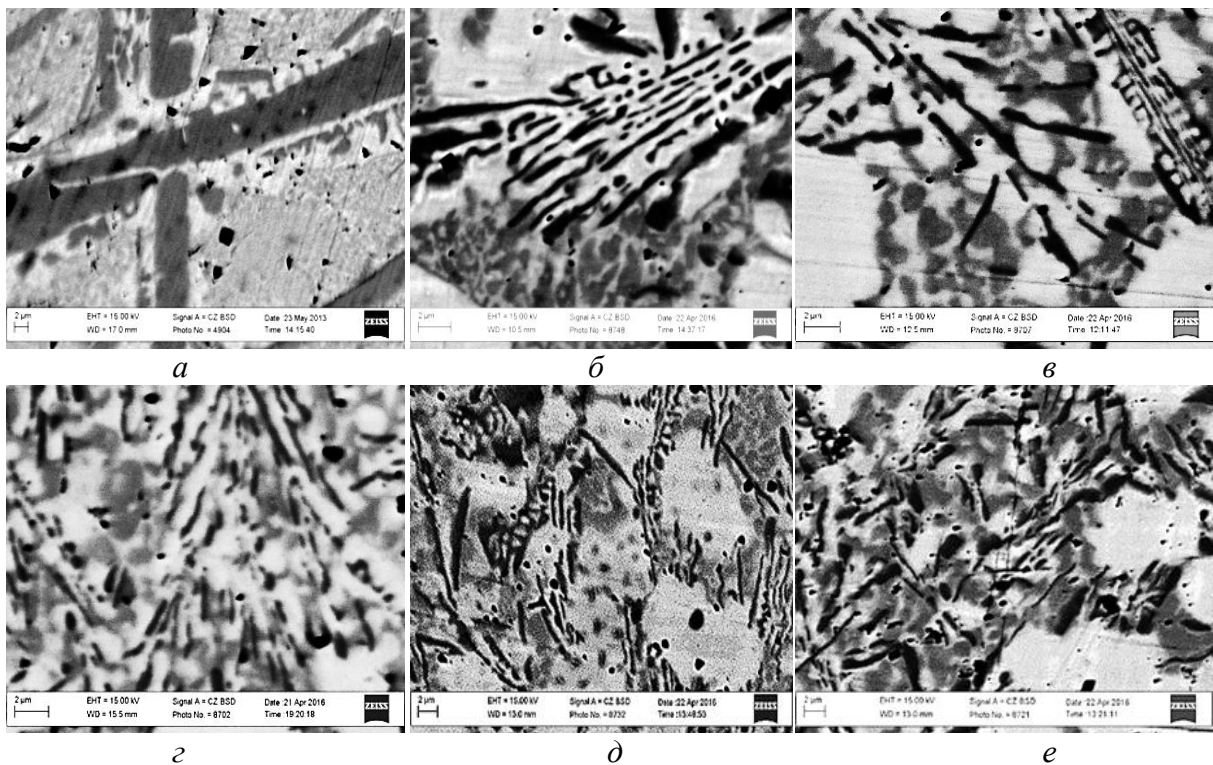


Рис. 9. Мікроструктура металу, наплавленого ПД 80Х20Р3Т без додавання (а - з) та з додаванням до його шихти 1 % (д) або 2 % (е) мас. ПАМ, без (а) та з використанням під час наплавлення горизонтальної вібрації амплітудою 70 (б), 200 (в) та 300 (г) мкм

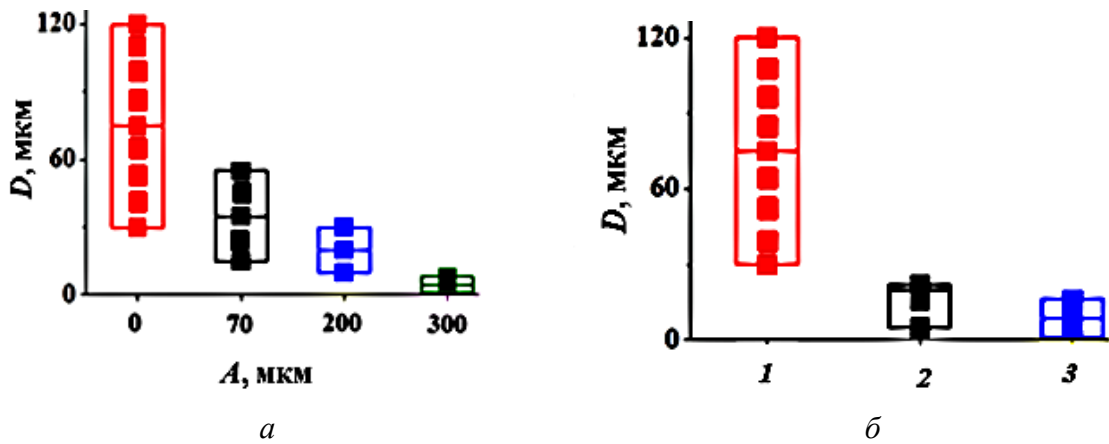


Рис. 10. Зміна середнього розміру  $D$  боридів  $(FeCr)B$ ,  $(FeCr)_2B$  у структурі металу, наплавленого ПД80Х20Р3Т, залежно від амплітуди горизонтальної вібрації  $A$  (а) та вмісту порошку ПАМ у шихті ПД без використання вібрації під час наплавлення (б):

1 – наплавлення ПД 80Х20Р3Т базового складу; 2, 3 – з додаванням до його шихти 1 та 2 мас. % порошку ПАМ

Наплавлення із застосуванням вібрації великогабаритних деталей складної форми суттєво ускладнюється або стає неможливим. У цьому випадку запропонували впливати на мікроструктуру наплавленого металу, додаючи до шихти ПД 80Х20Р3Т 1, 2 мас. % порошку ПАМ. Завдяки цьому виникають передумови для реакції окиснення магнію, розташованого в порожнинах шихти ПД, з утворенням дисперсних часточок оксиду магнію, які служать 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.

Порівняно мікроструктуру металу, наплавленого ПД 80Х20Р3Т базового складу і з додаванням до шихти порошку ПАМ, та встановлено, що легування магнієм сприяє подрібненню боридів та їх глобулюванню (рис. 9 д, е). Спектральним аналізом визначено, що після додавання до шихти ПД порошку ПАМ в мікроструктурі наплавленого металу переважали бориди типу  $(FeCr)_2B$ . У металі, наплавленому ПД 80Х20Р3Т базового складу, середній розмір боридів становив 30...120 мкм, а в наплавленому ПД з додаванням ПАМ їхній діаметр зменшився в середньому у 8 разів (рис. 10 б). Внаслідок додавання порошку ПАМ до шихти ПД 80Х20Р3Т у структурі наплавленого шару виділилися дисперсні (до 1 мкм) включення складнолегованих нітридів. Мікрорентгенівським спектральним аналізом встановлено склад включень у мікроструктурі металу, наплавленого ПД 80Х20Р3Т з додаванням до його шихти 2 мас. % порошку ПАМ (рис. 11). Середній розмір включень 0,1...0,5 мкм. В їх складі виявили 8 мас. % Al та по 14 мас. % Ti та Cr.

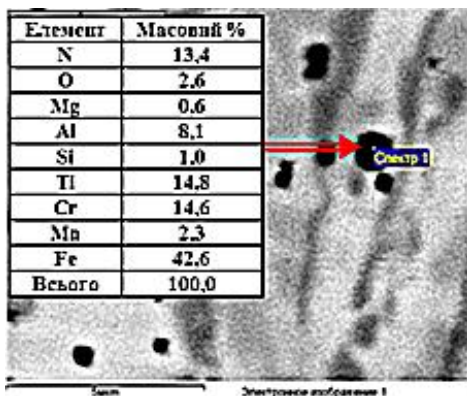


Рис. 11. Мікроструктура та поелементний склад металу, наплавленого ПД 80Х20Р3Т з додаванням до його шихти 2 мас. % порошку ПАМ

Виявили також вплив вібрації на перерозподіл фаз у структурі наплавлених шарів. У металі, наплавленому без вібрації ПД Х10Р3Г2С, де середній розмір боридних включень 175 мкм, співвідношення фаз становило:

(FeCr)V:(FeCr)<sub>2</sub>B – 4:1. Внаслідок диспергування боридних включень (за горизонтальної вібрації підкладки під час наплавлення) співвідношення фаз змінилося. Зокрема, за досягнення середнього розміру боридів 10 мкм вміст фази FeCr<sub>2</sub>B у структурі наплавленого металу збільшився, а співвідношення фаз стало (FeCr)V/(FeCr)<sub>2</sub>B–2,5/4, а за досягнення максимального диспергування, коли середній розмір фази FeCr<sub>2</sub>B становив 5 мкм, співвідношення фаз змінилося (FeCr)V/(FeCr)<sub>2</sub>B–1/5 (рис. 12 а).

У структурі металу, наплавленого ПД 80X20P3Т, відбулось диспергування боридних включень, а також, перерозподіл фаз внаслідок впливу вібрації під час наплавлення (рис 12 б). У вихідній структурі, де середній розмір боридних включень становив 70 мкм співвідношення фаз таке: (FeCr)V/(FeCr)<sub>2</sub>B – 3:1. За максимального подрібнення боридних включень (їх середній розмір 5 мкм) вміст твердої фази (FeCr)V зменшився, а пластичної фази (FeCr)<sub>2</sub>B збільшився (FeCr)V/(FeCr)<sub>2</sub>B–1:5.

Перерозподіл фаз у структурі наплавленого металу за використання вібрації зумовлений збільшенням кількості центрів кристалізації. Під час кристалізації розплаву без вібрації центрів кристалізації небагато, тому є умови для утворення, в першу чергу, боридних включень (FeCr)V, що виростають до великих розмірів. При цьому матриця збіднюється хромом. Вміст хрому у боридних включеннях (FeCr)V досягає 18, а бору 10 мас. %, і в матриці зменшується до 4 мас. %. Під час кристалізації за дії вібрації новоутворені кристали першого роду внаслідок кавітаційного впливу руйнуються, утворюючи велику кількість нових центрів кристалізації. Це сприяє формуванню, в першу чергу, боридів з нижчим вмістом бору, зокрема (FeCr)<sub>2</sub>B. Для утворення таких боридів потрібно менше хрому та бору (хрому 9, а бору 6 мас. %), що зумовлює їх більшу кількість (рис.12).

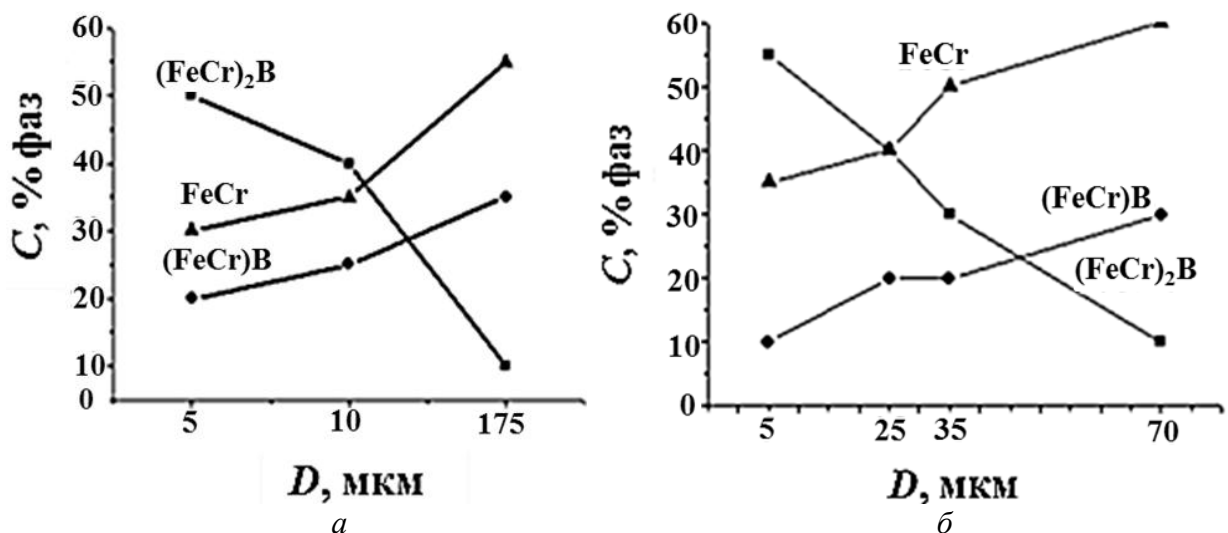


Рис. 12. Взаємозв'язок між фазовим складом  $C$  структурних складових і середніми значеннями їх розміру  $D$  в металі, наплавленому ПД X10P3Г2С (а) та ПД 80X20P3Т (б)

### Механічні характеристики наплавлених шарів

Вплив вібрації на мікротвердість металу, наплавленого ПД X10P3Г2С, оцінили поперек наплавлених валиків (рис. 13). Середня мікротвердість металу, наплавленого без вібрації, коли середній розмір боридних фаз становив 175 мкм, досягла ~600 HV (рис. 13, крива 1). Зі зростанням амплітуди вібрації діаметр боридних включень зменшується, що зумовлює зростання мікротвердості.



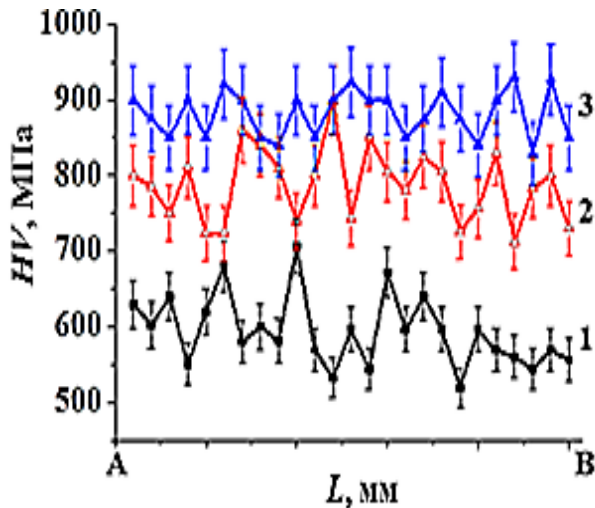


Рис. 13. Зміна мікротвердості HV поперек валиків металу, наплавленого ПД X10P3Г2С без (1) та з використанням під час горизонтальної вібрації амплітудою 70 (2) та 300 (3) мкм. L - відстань від центру гребеня валика А до центру зони його перекривання з суміжним валиком В

271 ГПа. У металі, наплавленому за горизонтальної вібрації амплітудою 300 мкм, він підвищився до 350 ГПа. Отже, за цим показником механічні властивості наплавленого металу поліпилися (глибина проникнення індентора зменшилася на 15 %, а опір матеріалу проникненню зріс на 20 % порівняно із металом, наплавленим без вібрації).

Середнє значення мікротвердості металу, наплавленого ПД 80X20P3Т без вібрації, становило 700 HV (рис. 14). За використання горизонтальної вібрації амплітудою 300 мкм мікротвердість зросла до 930 HV. Водночас розкид значень за амплітуди 70 та 200 мкм залишився суттєвим (рис. 14). Однак горизонтальна вібрація амплітудою 300 мкм найсильніше знизила розкид значень мікротвердості, що пов'язали з максимальним диспергуванням структурних складових. Модуль Юнга металу, наплавленого цим ПД, зріс від 310 (без вібрації під час наплавлення) до 360 ГПа (за горизонтальної вібрації амплітудою 300 мкм).

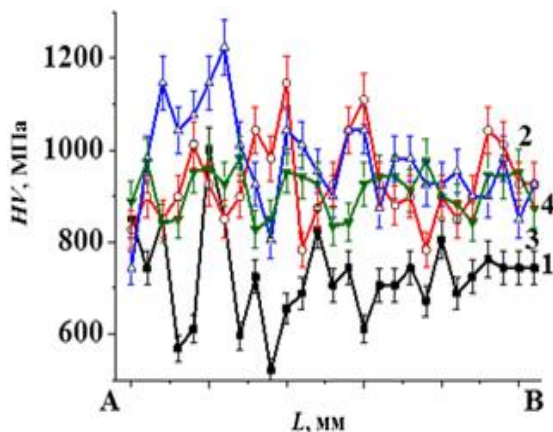


Рис. 14. Зміна мікротвердості металу, наплавленого ПД 80X20P3Т без застосування вібрації (1) та з використанням під час наплавлення горизонтальної вібрації амплітудою 70 (2), 200 (3) та 300 (4) мкм.

Зокрема за горизонтальної вібрації підкладки амплітудою 70 мкм, коли середній розмір фаз 10 мкм, середнє значення мікротвердості наплавленого металу зросло до ~790 HV (рис. 13, крива 2). Зі збільшенням амплітуди вібрації до 300 мкм середній розмір боридних включень зменшився до 5 мкм, що спричинило підвищення середнього значення мікротвердості до 870 HV (рис. 13, крива 3). Загалом мікротвердість металу, наплавленого ПД X10P3Г2С за горизонтальної вібрації підкладки, підвищилася у 1,5 рази.

Мікромеханічні характеристики наплавленого металу визначили методом динамічного індентування та склерометрії. Встановили, що модуль Юнга металу, наплавленого ПД X10P3Г2С без вібрації, становив

Після додавання до шихти ПД базового складу порошку ПАМ механічні характеристики наплавленого ним металу поліпилися. При цьому середнє значення мікротвердості металу зросло від 700 до 850 HV внаслідок утворення у його мікроструктурі значної кількості складнолегованих нітридів з високою твердістю. Додавання ПАМ у шихту ПД впливає на структурно-фазовий стан наплавленого шару, підвищує напруження на стиск другого роду в наплавленому металі з 281 до 378 МПа, зумовлює подрібнення боридів (FeCr)B, FeCr<sub>2</sub>B, підвищує

механічні характеристики наплавленого металу (на 15 % зріс модуль Юнга, а опір матеріалу проникненню індентора зріс на 19 %).

#### **Зносостійкість наплавлених шарів**

Досліджено зносостійкість наплавленого металу за умов абразивного зношування та розкрито механізми виникнення пошкоджень у наплавлених шарах залежно від складу використаного ПД та технології наплавлення. Встановлено, що шари наплавлені в умовах механічної вібрації мають підвищену абразивну зносостійкість. Зокрема, абразивна зносостійкість наплавленого шару закріпленим абразивом зросла в 2,5 рази, а незакріпленим в 2,3 рази, в умовах циклічного ударного навантаження – в 2,8 рази. 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 175 до 5 мкм підвищення рівня напружень стиску другого роду в наплавленому шарі і як наслідок зросла його мікротвердість – з 700 до 930 МПа. Зі збільшенням вмісту фази (FeCr)<sub>2</sub>B у наплавленому шарі підвищується модуль Юнга та опір крихкому руйнуванню, що також вплинуло на зростання зносостійкості наплавленого шару (табл. 1).

Таблиця 2. Відносна зносостійкість наплавленого металу з ПД X10P3Г2С за умов абразивного зношування по відношенню до наплавленого металу без вібрації

Умови наплавлення	Без вібрації	Горизонтальна вібрація	
		70	300
Амплітуда механічних коливань, мкм	-	70	300
Середній розмір боридів, мкм	175	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) <sub>2</sub> B	4/1	2,5/4	1/5

Характер пошкоджень на поверхні наплавлених шарів після тертя добре узгоджується з втратами маси зразків. На поверхні тертя наплавленого металу без застосування вібрації присутні глибокі, майже паралельні, канавки та сліди від викришених боридів (FeCr)B (рис. 15, а). У зоні контактування металу, наплавленого за горизонтальної вібрації амплітудою 300 мкм, з абразивним кругом практично не було крихких відколів, оскільки збільшується кількість пластичної фази (FeCr)<sub>2</sub>B (рис. 15, б). Це узгоджується із морфологією поверхні зношування, на якій спостерігали неглибокі, дрібні і нерівномірно розташовані подряпини.

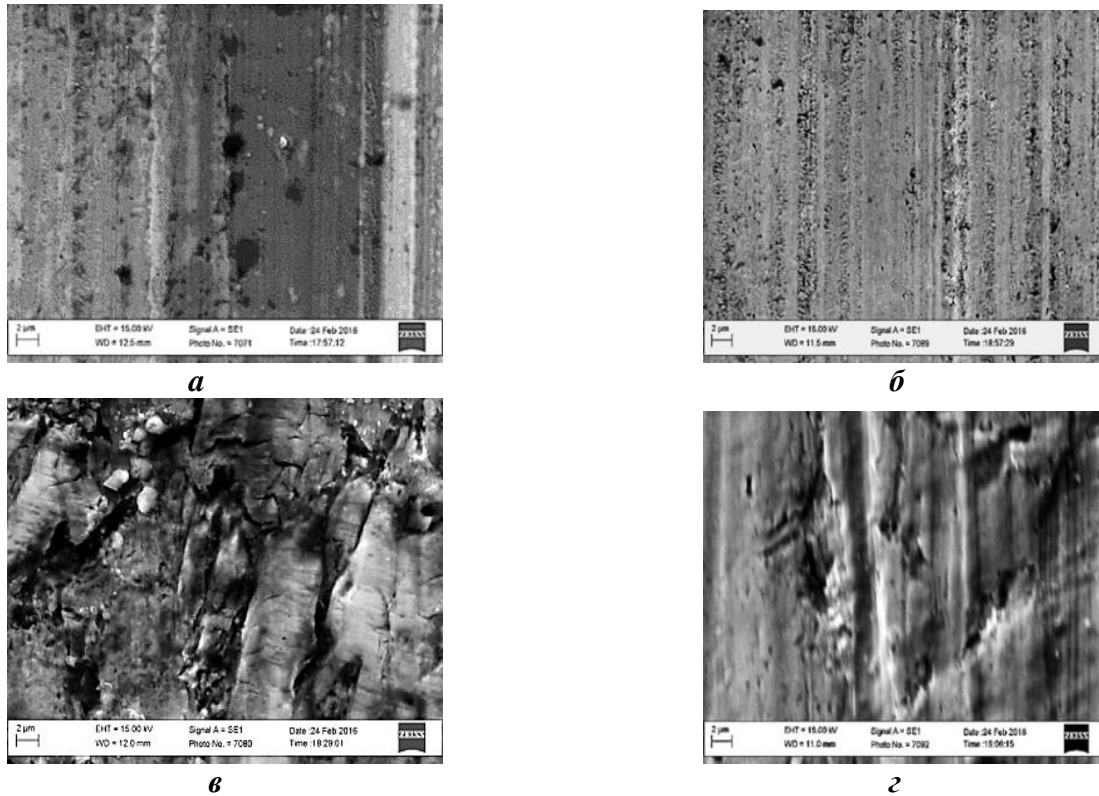


Рис. 15. Морфологічні особливості поверхонь тертя металу, наплавленого ПД Х10Р3Г2С без (а, в) та за використання горизонтальної (б, г) вібрації зразків амплітудою 300 мкм, для зношування закріпленим (а, б) і незакріпленим (в, г) абразивом

За зношування незакріпленим абразивом металу наплавленого без вібрації основним механізмом зношування є викришування твердих боридів  $(\text{FeCr})\text{B}$  (рис. 15 в). Причому, незакріплений абразив суттєво сприяє цьому. За наплавлення з використанням горизонтальної вібрації в структурі металу виділялися дрібні пластичні включення боридів  $(\text{FeCr})_2\text{B}$ . Тому їх викришування із феритної матриці ускладнилося. Як наслідок, знос наплавленого металу також знизився, а на поверхні зношування спостерігали лише неглибокі вищербини (рис. 15, г).

Характер ушкоджень поверхні наплавленого металу за ударних навантажень аналізували на гребнях валиків та в зоні їх перекриття із суміжними валиками. На гребнях валиків в металі, наплавленому без вібрації, зафіксували високу густину і локальність пошкоджень (рис. 16 а). Пошкодження на гребнях валиків розпочиналося з пластичного деформування, порушення когезивного зв'язку між твердими боридами і пластичнішою матрицею з подальшим вилущуванням спочатку великих, а потім і дрібніших боридів з металу через їх недостатню силу зчеплення з матрицею. В зоні ж перекриття валиків області вилущування збільшувалися за розмірами і наплавлений метал пошкоджувався внаслідок розтріскування і вищерблення боридів (рис. 16, б).

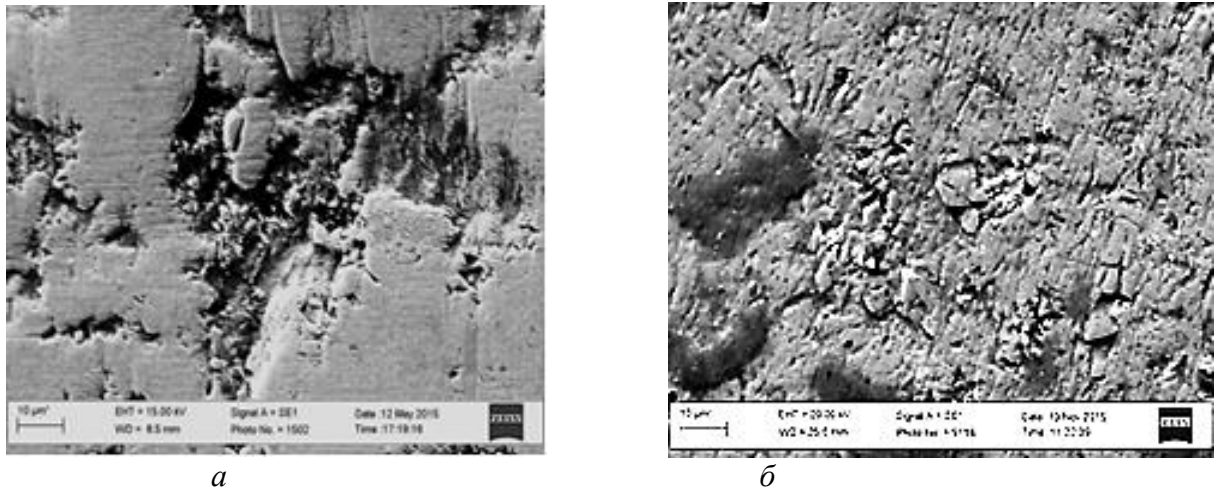


Рис. 16. Морфологія ушкоджень, спричинених зношуванням від ударних навантажень металу, наплавленого ПД Х10РЗГ2С без застосування вібрації (а), за горизонтальної вібрації амплітудою 300 мкм (в)

За використання горизонтальної вібрації амплітудою 300 мкм змінилося співвідношення фаз і морфологія структурних складових наплавленого шару. Така структурно-фазова композиція якісно змінила характер впливу ударних навантажень. Основним чинником зношування металу і на гребенях валиків, і в зоні їх перекриття стає здатність наплавленого шару пластично деформуватися і таким чином релаксувати напруження, що виникають під час випробування на ударне зношування. Це властиве металу на гребенях валиків і в зоні їх перекриття та пов'язане із найвищою дисперсністю пластичної фази  $(\text{FeCr})_2\text{B}$ . Відзначили також найнижчу (з усіх аналізованих варіантів формування наплавленого шару) схильність поверхневих шарів до розтріскування металу, наплавленого за використання горизонтальної вібрації (рис. 16, б).

Накладання вібрації під час наплавлення металу з ПД 80Х20Р3Т, як і для металу, наплавленого з ПД Х10РЗГ2С, також приводить до суттєвого зменшення середнього розміру боридних включень, і, як наслідок, зростає його зносостійкість (табл. 3).

Таблиця 3. Відносна зносостійкість наплавленого металу з ПД 80Х20Р3Т по відношенню до наплавленого металу без вібрації

Вид зношування	Без вібрації	Горизонтальна вібрація амплітудою, мкм		
		70	200	300
Середній розмір боридів, мкм	70	35	25	5
Закріпленим абразивом	1	0,9	1,2	1,7
Незакріпленим абразивом	1	1,3	1,5	1,7
За умов ударних навантажень	1	1	1,3	2
Співвідношення фаз $(\text{FeCr})\text{B}/(\text{FeCr})_2\text{B}$	3:1	3:2	2:4	1:5

Зокрема, із зменшенням середнього розміру боридних включень від 70 до 5 мкм за умов зношування закріпленим та незакріпленим абразивом зносостійкість металу наплавленого зростає в 1,7 разів, а за зношування під циклічним ударним навантаженням – вдвічі.

Проаналізували морфологію ушкоджень на поверхні за таких умов зношування і виявили елементи крихкого мікророзтріскування металу, наплавленого без вібрації (рис.

17, а). Разом з тим не спостерігали зон істотного викришування, що зв'язали з високою пластичністю аустенітної матриці та присутністю зміцнювальної пластичної фази  $(FeCr)_2B$ . У наплавленому металі, за накладання горизонтальної вібрації, в результаті зношування зафіксували ознаки пластичного деформування (рис. 17, б). Пошкодження наплавленого

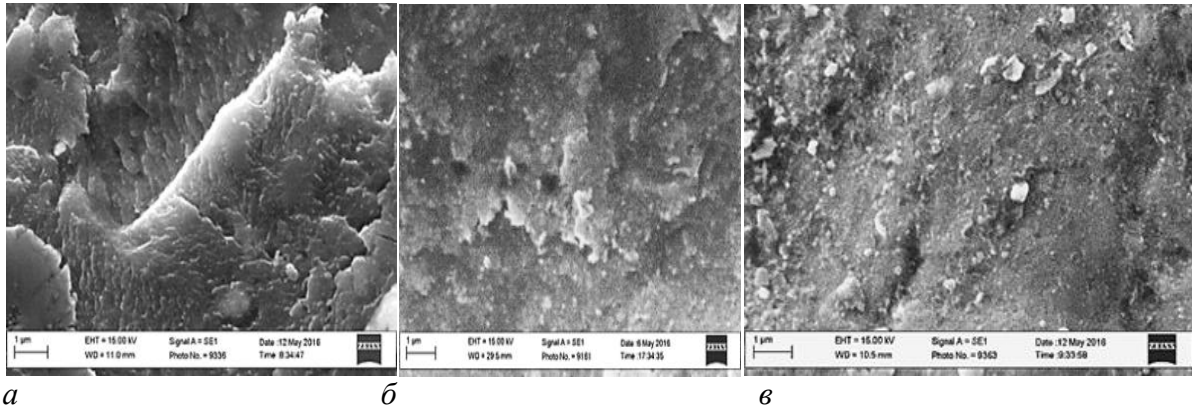


Рис. 17. Морфологія поверхні зношування за ударних навантажень металу, наплавленого ПД 80Х20Р3Т без (а) та з застосуванням горизонтальної вібрації амплітудою 300 мкм (б), та ПД 80Х20Р3Т з додаванням до шихти 1 мас. % ПАМ (в)

металу відбувалося шляхом відшарування поверхневого шару оксидів.

Додавання до шихти ПД 80Х20Р3Т 1 мас. % ПАМ сприяє підвищенню зносостійкості наплавленого металу в 1,6 рази за умов зношування закріпленим та незакріпленим абразивом; за зношування під дією циклічним ударним навантаженням зносостійкість

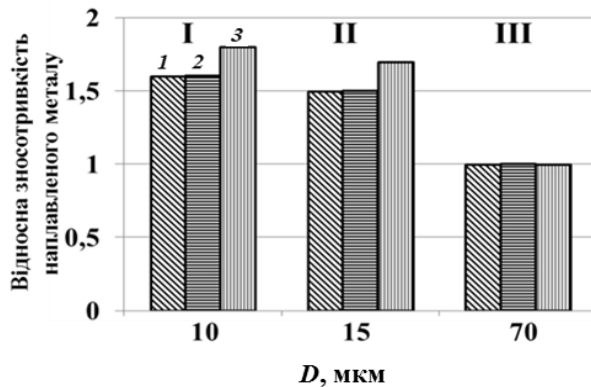


Рис. 18. Відносна зносостійкість наплавленого металу ПД80Х20Р3Т в залежності від середнього розміру боридів (I)–1 мас %, (II)–2 мас % та (III) та без порошку ПАМ, (1) закріпленим, (2) незакріпленим абразивом (3) при дії ударних навантажень порівняно з вихідним наплавленим металом

наплавленого металу, яке залежить від параметрів коливань. Внаслідок горизонтальної вібрації амплітудою 300 мкм середній розмір окремих боридних включень зменшується від 250...300 до 4...5 мкм.

підвищилася у 1,8 разів порівняно з металом, наплавленим ПД базового складу (рис. 18).

Це зростання зумовлено підвищенням твердості наплавленого шару як внаслідок диспергування зміцнювальної боридної фази, так і через додаткове виділення дрібнодисперсних складнолегованих нітридів у структурі наплавленого шару.

Механізм пошкодження поверхні металу, наплавленого ПД 80Х20Р3Т з додаванням до його шихти 1 мас. % ПАМ, під час випробовувань на абразивне зношування також змінився із крихкого на пластичний.

#### Висновки

1. Встановлено, що вібрація деталі під час її наплавлення зумовлює диспергування структури

2. Механічна вібрація сприяє перерозподілу фаз під час наплавлення, через що мікротвердість наплавленого металу підвищується від 600 до 870 НВ за горизонтальної вібрації та рівномірніше розподіляється на поверхні наплавленого металу.

3. Наплавлені шари, отримані за горизонтальної вібрації, виявили підвищену (у 2,3–2,5 рази) абразивну зносостійкість за тертя закріпленим та незакріпленим абразивом порівняно з шаром, наплавленим без вібрації. Розкрито особливості механізму зношування, згідно з яким підвищення зносостійкості шару, отриманого за використання вібрації, пов'язали з меншою кількістю вищербин на поверхні тертя через подрібнення боридних включень.

4. 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 таким чином релаксувати напруження.

5. Виявлено, що додавання до шихти ПД базової системи Fe–Cr–B–C порошку ПАМ (1 мас. %) сприяє подрібненню включень боридів у наплавленому металі (до 7 разів).

6. Встановлено, що порошок ПАМ у шихті ПД 80X20P3T сприяє виділенню в структурі наплавленого шару дисперсних (не більше за 1 мкм) включень складнолегованих нітридів, які суттєво підвищують мікротвердість (в 1,2 рази) і, відповідно, зносостійкість (у 1,5 рази) наплавлених шарів, а механізм зношування під час випробовувань на абразивне зношування змінюється із крихкого на пластичний.

7. Дослідно-промислова перевірка, виконана у “Львівському КБ” та “Терміналі-НВКП”, підтвердила, що запропоновані методи диспергування структури підвищують твердість і зносостійкість шарів, наплавлених ПД базової системи Fe–Cr–B–C, і є перспективними для підвищення ресурсу деталей машин і агрегатів, які експлуатуються за умов абразивного та ударно-абразивного зношування, а тому у багатьох випадках можуть бути альтернативними до дорогих вольфрам-, молібден-, ніобіймістких електродних матеріалів.

**M. Student, H. Pokhmurs'ka, A. Sudakov, A. Dzyubyk, A. Voitovych**

<sup>1</sup>*Karpenko Physico-mechanical institute of the NAS of Ukraine*

*Lviv Polytechnic National University, Ukraine*

<sup>3</sup>*National technical university "Dnipro Polytechnic", Ukraine*

#### **MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CLADED LAYERS OF CORE WIRE FOR MECHANICAL VIBRATION OF PARTS**

*For the first time, regularities of the influence of the direction and the amplitude of the mechanical vibration of the substrate on the structure-phase composition, morphology and the dimensions of the reinforcing inclusions in the structure of the layers deposited with economically verified CW-Fe-Cr-B-C under the flux layer were established. It is established that mechanical vibration changes the phase composition of the deposited layer, the FeCrB phase decreases, and the FeCr<sub>2</sub>B phase increases. The parameters of vibration of the substrate during surfacing of its surface have been optimized to modify the structure of the weld metal and to achieve maximum wear resistance. For the first time, it was proposed to grind the boride inclusions in the structure of the deposited layers by adding to the composition of the charge charge of the Fe-Cr-B-C PAM powder (60% Al 40% Mg). It is established that after adding 1 wt. adding 1% by weight of powder, dispersion of the strengthening boride phase is increased by 7 times. It was first established that in the presence of CW 80Cr20B3Ti powder in the structure of the deposited layer, fine-dispersed (up to 1 μm) inclusion of complexly-substituted nitrides, which significantly increase the microhardness (1.2 times) and, respectively, wear resistance (1.5 times) of welded layers.*

**Key words:** *core wires, abrasive wear resistance, deposited layers, microstructure, boride inclusions*

*Впервые установлены закономерности влияния направления и амплитуды механической вибрации подложки на структурно-фазовый состав, морфологию и размеры укрепляющих включений в структуре слоев, наплавленных экономнолегированных ПП системы Fe-Cr-B-C под слоем флюса.*

Установлено, что механическая вибрация изменяет фазовый состав наплавленного слоя, количество фазы  $FeCrV$  уменьшается, а фазы  $FeCr_2V$  растет. Оптимизированы параметры вибрации подложки во время наплавки ее поверхности для модификации структуры наплавленного металла и достижения максимальной износостойкости. Впервые предложено измельчать боридные включения в структуре наплавленных слоев путем добавления в состав шихты ПП системы  $Fe-Cr-V-C$  порошка ПАМ (60% Al 40% Mg). Установлено, что после добавления 1 мас. % порошка диспергирование укрепляющей боридной фазы увеличивается в 7 раз. Впервые установлено, что при наличии в шихте ПП 80X20P3T порошка ПАМ в структуре наплавленного слоя выделяются мелкодисперсные (до 1 мкм) включения сложнолегированных нитридов, которые ощутимо повышают микротвердость (в 1,2 раза) и, соответственно, износостойкость (в 1,5 раза) наплавленных слоев

**Ключевые слова:** порошковые проволоки, абразивная износостойкость, наплавленные слои, микроструктура, боридные включения.

### Література

1. Похмурська Г. В. Вплив вібрації під час наплавлення захисного шару на його мікроструктуру та ударно-абразивне зношування / Г. В. Похмурська, М. М Студент, О. С Ланець, А. А Войтович // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. –51, №1. – С. 107–111.
2. Войтович А. А. Мікроструктура та опір абразивному зношуванню вібронеплавленого металу з порошкового дроту базової системи  $Fe-Cr-V$  / А. А Войтович, Г. В. Похмурська, М. М Студент, О. З Студент // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – 52, №3. – С. 63–68.
3. Войтович А. А. Особливості формування та руйнування наплавлених шарів з порошкових дротів системи  $Fe-Cr-V-C$  за ударних навантажень / А. А Войтович, Г. В. Похмурська, М. М Студент, О. З Студент // Проблеми трибології.-2015. – 78, №4. – С. 105–113.
4. Похмурская Г. В. Влияние высокочастотных механических колебаний изделия на структуру и износостойкость наплавленного металла X10P3Г2С / Г. В. Похмурська, М. М Студент, А. А Войтович, О. З Студент, А. Р. Дзюбик // Автоматическая сварка. – 2016. – №10.-С. 22–27.
5. Похмурська Г. В., Студент М. М., Дзюбик А. Р., Войтович А. А., Хлопик О. П. Корозійна тривкість вібронеплавленого металу з порошкових дротів базової системи  $Fe-Cr-V$  / Г. В. Похмурська, М. М Студент, А. Р. Дзюбик, А. А Войтович, О. П. Хлопик // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – 52, №5. – С. 83–87.

Надійшла 02.07.19

### References

1. Pokhmurska H. V., Student M. M, Lanets O. S, Voitovych A. A (2015) Vplyv vibratsii pid chas naplavlennia zakhysnoho sharu na yoho mikrostrukturu ta udarno-abrazyvne znoshuvannia [Influence of vibration during surfacing of the protective layer on its microstructure and impact-abrasive wear]. *Fiz.-khim. mekhanika materialiv – Physico-Chemical Mechanics of Materials*, 1 (51), 107–111 [in English].
2. Voitovych A. A, Pokhmurska H. V., Student M. M, Student O. Z (2016) Mikrostruktura ta opir abrazyvnomu znoshuvanniu vibronaplavlennoho metalu z poroshkovoho drotu bazovoi systemy  $Fe-Cr-V$  [Microstructure and resistance to abrasive wear of vibrofluid metal from core wire of the base system  $Fe-Cr-V$ ]. *Fiz.-khim. mekhanika materialiv – Physico-Chemical Mechanics of Materials*, 3 (52), 63–68 [in English].
3. Voitovych A. A., Pokhmurska H. V., Student M. M., Student O. Z. (2015) Osoblyvosti formuvannia ta ruinuvannia naplavlenykh shariv z poroshkovykh drotiv systemy  $Fe-Cr-V-C$  za udarnykh navantazhen [Peculiarities of the formation and destruction of surfaced

- layers of powdered wires of the Fe-Cr-B-C system for impact loads]. *Problemy trybolohii – Problems of Tribology*, 4 (78), 105–113 [in English].
4. Pokhmurskaia H. V., Student M. M., Voitovych A. A., Student A. Z., Dziubyk A. R. (2016) Vliyaniye vysokochastotnykh mekhanicheskikh kolebaniy yzdelyia na strukturu y uznosostoykost naplavlennoho metalla Kh10R3H2S [The effect of high-frequency mechanical vibrations of the product on the structure and wear resistance of the deposited metal X10B3Mn2Si]. *Avtomatycheskaia svarka – Automatic welding*, 10, 22–27 [in English].
  5. Pokhmurska H. V., Student M. M., Dziubyk A. R., Voitovych A. A., Khlopyk O. P. (2016) Korozhiina tryvkist vibronaplavlennoho metalu z poroshkovykh drotiv bazovoi systemy Fe-Cr-B [Corrosion resistance of vibrofluidic metal from core wires of Fe-Cr-B base system]. *Fiz.-khim. mekhanika materialiv – Physico-Chemical Mechanics of Materials*, 5 (52), 83–87 [in English].

УДК 622.24

DOI: 10.33839/2223-3938-2019-22-1-148-157

**О. М. Давиденко**, д-р техн. наук, **А. О. Ігнатов**, канд. техн. наук

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького,  
19, 49027, м. Дніпро, Україна, e-mail: davidenko.a.n@ntu.one*

## **МЕХАНІКА ЕФЕКТИВНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ШАРОШКОВО-ЛАНЦЮГОВИМИ ДОЛОТАМИ**

*Лабораторними і аналітичними прийомами досліджень встановлено та обґрунтовано основоположні принципи конструювання високопродуктивних комбінованих доліт, а також розглянуто ключові аспекти механіки елементарного акту руйнування гірської породи з максимальним урахуванням її механічних властивостей та оцінкою впливу середовища руйнування.*

*Розроблено конструкцію комбінованого ланцюгового дискового долота з можливістю саморегулювання його робочого органу та забезпеченням значної ефективності механізму руйнування різних за твердістю гірських порід. Аналітично та практично доведено, що під дією робочого органу комбінованого долота в гірській породі виникає напруга зсуву, яка призводить до генерування пружних хвиль руйнування, у міру поширення яких частина енергії витрачається на здійснення роботи руйнування, а інша її частина, змінюючи напрям руху, розсіюється в масиві. Показано, що до параметрів хвилі, які визначають процес руйнування, слід віднести напругу, інтенсивність, тривалість і спектральний склад. Встановлено та формалізовано наявність механізму поширення пружної хвилі в гірській породі і його супроводження безперервним поглинанням енергії середовищем і явищем дисперсії. Доведена достатня технологічність комбінованих доліт, особливо за умов зменшення коефіцієнта поглинання, зменшення непродуктивних втрат, що переводять енергію хвилі в тепло, збільшення відведення енергії з інструменту в породу.*

*Механізм поглинання енергії породою значною мірою визначає характер процесу руйнування; за умов значного поглинання, навіть при короткочасних навантаженнях, процес може вважатися квазістатичним, якщо ж поглинання енергії мале – порівняно тривалі навантаження призводять до динамічного режиму руйнування.*

*Отримані результати лабораторних і аналітичних досліджень є базовими для проектування конструктивних характеристик окремих вузлів комбінованих доліт. Дані з механіки руйнування гірських порід є основою подальших дослідницьких робіт з розробки*