

УДК 791.927.535

МІКРОСТРУКТУРА ТА ОПІР АБРАЗИВНОМУ ЗНОШУВАННЮ ВІБРОНАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ З ПОРОШКОВОГО ДРОТУ БАЗОВОЇ СИСТЕМИ Fe–Cr–B

А. А. ВОЙТОВИЧ¹, Г. В. ПОХМУРСЬКА¹, М. М. СТУДЕНТ², О. З. СТУДЕНТ²

¹ Національний університет "Львівська політехніка";

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Досліджено мікроструктуру наплавлених шарів із порошкового дроту ПД Х10Р4Г2С. Встановлено фазовим і підтверджено спектральним аналізом, що в структурі наплавленого шару включення Fe₂B та (FeCr)B розподілені на фоні матриці (твердий розчин FeCr). Без застосування вібрації під час наплавлення розміри боридів змінювалися від 10 до 150 μm² (в центрі валиків) та 50...300 μm² (в зоні перекривання наплавлених шарів). Використання під час наплавлення горизонтальної вібрації амплітудою 300 μm призводить до максимального подрібнення фаз (FeCr)B та (Fe₂B) до 2...5 μm² як в центрі валиків, так і в зоні їх перекривання, що підвищує мікротвердість наплавлених шарів та позитивно впливає на їх абразивну зносотривкість. Втрати маси під час зношування закріпленим і незакріпленим абразивом зменшуються у 2–2,5 рази.

Ключові слова: наплавлені шари, зносотривкість, абразив, вертикальна та горизонтальна вібрація, порошкові дроти системи Fe–Cr–B.

Наплавлення під шаром флюсу широко використовують для відновлення та продовження ресурсу елементів устаткування [1]. За наплавлення порошковим дротом (ПД) системи Fe–Cr–B у мікроструктурі наплавленого шару формуються великі бориди гострокутної форми, які створюють передумови для зародження мікротріщин. Для підвищення роботоздатності наплавлених шарів, отриманих з використанням струму високої частоти та плазмового методу, раніше використано постійну вібрацію підкладки в горизонтальному та вертикальному напрямі [2, 3]. Встановлено, що за горизонтальної вібрації структурні складові сталі диспергуються і округлюються [4–6].

Мета роботи – дослідити вплив горизонтальної та вертикальної вібрацій стола з частотою 100 Hz під час електродугового наплавлення вуглецевої сталі порошковим дротом ПД Х10Р4Г2С під шаром флюсу на мікроструктуру та абразивну зносотривкість наплавлених шарів.

Методики досліджень. Наплавлені шари формували на підкладці з низьковуглецевої сталі Ст3сп під шаром флюсу ОСЦ 45М (mass%: 44 SiO₂, 44 MnO, < 2,5 MgO, 6...9 CaF₂, < 6,5 CaO, < 2 Fe₂O₃, < 0,15 S, < 0,15 P) з використанням дроту ПД Х10Р4Г2С діаметром 2,6 mm з коефіцієнтом заповнення 25%. Наплавляли зразки розміром 300×150×10 mm. Частота горизонтальної чи вертикальної вібрації становила 100 Hz за амплітуди переміщення столика 70 та 300 μm. За горизонтальної вібрації столик переміщували поперек наплавленого валика. Перед наплавленням ПД та флюс висушували за температури 250°C упродовж 2,5 h. Валики наплавляли з використанням підвісної головки АБС, яку живили від генератора ПСО 500, за таких параметрів: струм 450...480 А, напруга дуги 30...32 V,

швидкість подавання ПД 96 м/х, швидкість наплавлення 62 м/х, перекривання доріжок 30%. Фазовий аналіз виконали на рентгенівському дифрактометрі D8 Discover з Co-випромінюванням. Хімічний склад шару та його мікроструктуру дослідили на електронному мікроскопі EVO 40 XVP із системою спектрального мікроаналізу INCA Energy 350. Зносотривкість наплавлених шарів за зношування незакріпленим абразивом оцінили згідно з ГОСТ 23.208-79. Просушений кварцовий пісок з розміром частинок 200...1000 μm безперервно подавали у зону тертя гумового диска зі зразком. Швидкість обертання диска становила 0,3 м/с, а сила його притискання до зразка 2,4 кН. Для визначення зносу наплавленого шару закріпленим абразивом використали абразивний круг СМ-2 на керамічній зв'язці. Лінійна швидкість тертя становила 0,8 м/с за навантаження в зоні лінійного контакту 1,5 кН. Оцінювали знос після однакової довжини випробувального шляху 720 м за зміною маси зразків.

Результати досліджень та їх обговорення. Дослідивши фазовий склад наплавлених шарів, отриманих без застосування вібрації, виявили на фоні феритної матриці FeCr великі включення залізохромистих боридів (FeCr)B та дрібні включення Fe₂B (рис. 1а, d). На гребнях валиків площа включень фази (FeCr)B змінювалась від 10 до 150 μm^2 , тоді як у зоні їх перекривання, де ця фаза повторно плавилася, їх площа досягала 50...300 μm^2 .

За горизонтальної вібрації зразка у мікроструктурі наплавлених шарів виявили виділення матричної фази FeCr у вигляді нерівновісних зерен (рис. 1b, c, e). За амплітуди коливання зразків 70 μm їх ширина та довжина на гребнях валиків становила 10 та 40 μm відповідно, а за амплітуди 300 μm ці розміри зменшилися до 5 та 30 μm .

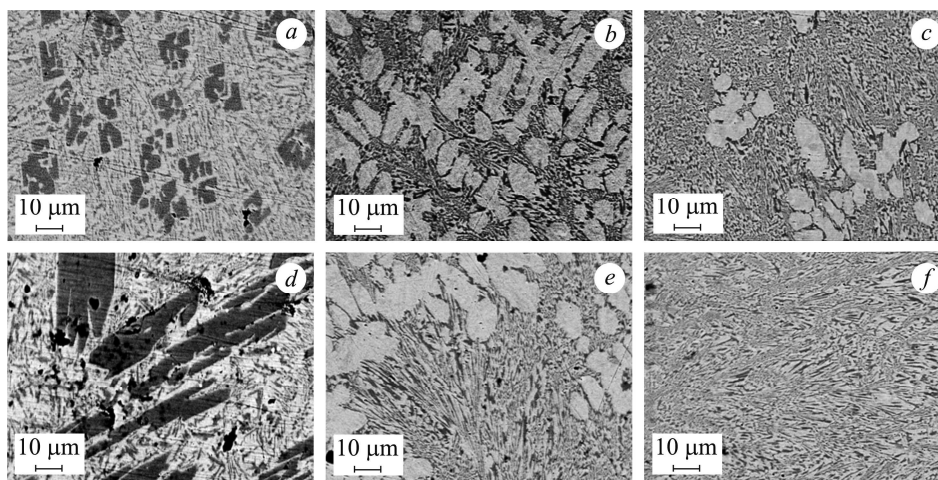


Рис. 1. Мікроструктура металу, наплавленого порошковим дротом ПД Х10Р4Г2С: а-с – на гребені валика; d-f – в зоні перекривання валиків; а, d – без застосування вібрації під час наплавлення зразків; b, c, e, f – за горизонтальної вібрації амплітудою 70 (b, e) та 300 μm (c, f) під час наплавлення зразків.

Fig. 1. Microstructure of the cladding metal obtained by welding with CW Cr10P4Mn2C cored wire: a-c – on the roller crest; d-f – in the rollers overlapping zone; a, d – without vibration; b, c, e, f – under horizontal vibration with amplitude 70 (b, e) and 300 μm (c, f) in specimens welding.

Причому в зоні перекривання валиків матричну фазу у вигляді окремих зерен FeCr майже не спостерігали (рис. 1f). Структура, в основному, відповідала евтектичній (у вигляді механічної суміші дрібних пластинок боридів Fe₂B на фо-

ні феритної матриці FeCr та дуже дрібних включень (FeCr)В, які розташовувалися порівняно рівномірно на фоні евтектики). Крім того, за використання під час наплавлення горизонтальної вібрації структурні складними істотно подрібнилися. Зокрема, за прикладання до зразка горизонтальної вібрації амплітудою 70 μm чітко зафіксували подрібнення залізохромистих боридів (FeCr)В (рис. 1*b, e*). Їх площа змінювалася від 5 до 30 μm^2 . Зі збільшенням амплітуди коливань до 300 μm розміри включень (FeCr)В подрібнилися ще сильніше до 2...5 μm^2 (рис. 1*c, f*).

За наплавлення зразків з використанням вертикальної вібрації амплітудою 70 μm тверді включення (FeCr)В на гребнях валиків (рис. 2*a*) також істотно подрібнилися (до 5...60 μm^2) порівняно з наявними в структурі наплавленого шару без застосування вібрації (10...150 μm^2), тоді як в зоні перекривання валиків площа боридів виявилася дещо вищою і змінювалася від 15 до 75 μm^2 (рис. 2*b*). Причому включення дещо витягнулися в напрямі наплавлення валиків. Зі збільшенням амплітуди вертикальної вібрації до 300 μm на гребні валиків всі включення в мікроструктурі наплавленого шару чітко зорієнтовані в напрямі наплавлення валиків, а лінзоподібні за формою частинки Fe₂V максимально подрібнилися і рівномірно розподілилися в матриці FeCr (рис. 2*c*).

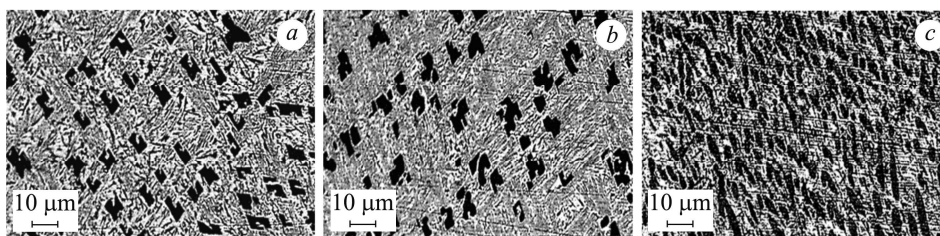


Рис. 2. Мікроструктура металу, наплавленого ПД Х10Р4Г2С за вертикальної вібрації зразків амплітудою 70 (*a, b*) і 300 μm (*c*): *a, c* – на гребнях валиків; *b* – в зоні перекривання валиків.

Fig. 2. Microstructure of the cladding layers obtained by welding with Cr10P4Mn2C cored wire under vertical vibration of specimens with amplitude of 70 (*a, b*) and 300 μm (*c*): *a, c* – on the roller crest; *b* – in rollers overlapping zone.

Таким чином, за горизонтальної вібрації, коли ванна розплавленого металу вібує між обмежувачами із застиглого металу по обидва боки валика, а розплав поступально коливається між ними, попри значне зменшення перерізу включень боридів (FeCr)В істотно зросла кількість їх зародків.

Використання вертикальної вібрації під час наплавлення виявилось менш ефективним для подрібнення включень боридів (FeCr)В і хоча змінилася їх морфологія (лінзоподібна форма), але загалом вони розташовувалися у вигляді стрічок, орієнтованих у напрямі накладання валиків.

Отже, як показали металографічні дослідження, і напрям, і амплітуда коливань під час наплавлення вплинули і на фазовий склад, і на морфологію, і на розміри та розподіл фаз у наплавленому шарі, що, своєю чергою, повинно вплинути на твердість металу наплавлених шарів.

Мікротвердість, заміряна у напрямі від гребеня валика до зони його перекривання з суміжним валиком, змінювалася немонотонно (рис. 3). Середня мікротвердість металу, наплавленого без застосування вібрації, становила ~ 600 HV за розкиду від 550 до 650 HV. З розподілу мікротвердості поперек валиків видно, що існує незначна тенденція її зниження від гребеня валика до зони його перекривання зі суміжним валиком (рис. 3*a*, крива 1). Середня мікротвердість наплавленого металу за використання горизонтальної вібрації амплітудою 70 μm становить ~ 790 HV (700...850 HV) (рис. 3*a*, крива 2). Проте збереглися значні перепа-

ди за значенням мікротвердості, що пояснюється нерівномірністю мікроструктури, до складу якої входили великі зерна м'якої феритної фази FeCr. За амплітуди горизонтальної вібрації 300 μm досягнули ще вищого значення мікротвердості з середнім значенням 870 HV (850...910 HV) (рис. 3a, крива 3), при цьому зменшилися її перепади. Зі зміною напрямку вібрації на вертикальну за амплітуди 70 μm мікротвердість змінювалася нерівномірно від низьких значень (700 HV) до високих (950 HV) (рис. 3b, крива 2). З підвищенням амплітуди вертикальної вібрації до 300 μm зросло середнє значення мікротвердості до 910 HV (750...980) HV, проте максимально зросла також її нерівномірність поперек валків (рис. 3b, крива 3).

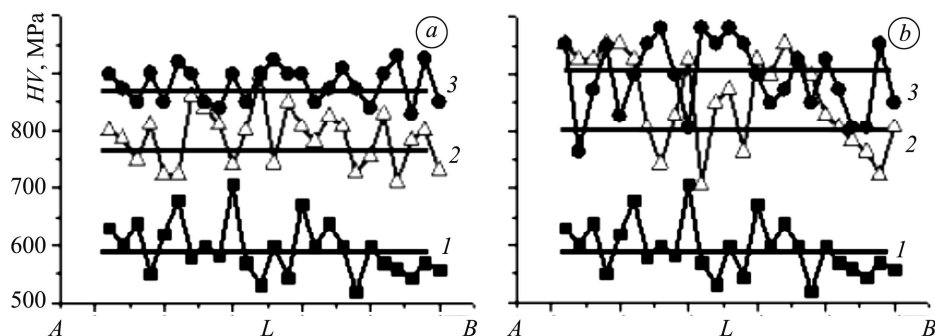


Рис. 3. Зміна мікротвердості HV наплавленого металу в напрямі від центра гребеня валка (A) до центра зони його перекривання (L) зі суміжним валком (B) за використання під час наплавлення горизонтальної (a) та вертикальної (b) вібрацій: 1 – без застосування вібрації; 2 – за амплітуди вібрації 70 μm ; 3 – 300 μm .

Fig. 3. Change of microhardness HV of the cladding metal in the direction from the center of the roller crest (A) to the center of its overlapping area (L) with the adjacent roller (B) due to the use of horizontal (a) and vertical (b) vibration during welding: 1 – without vibration; 2 – with vibration amplitude 70 μm ; 3 – 300 μm .

Втрата маси зразків з наплавленими шарами, 10^{-3} g

Зношування	Без вібрації	Горизонтальна вібрація		Вертикальна вібрація	
	Амплітуда, μm				
	0	70	300	70	300
закріпленим абразивом	35	30	15	100	150
незакріпленим абразивом	20	15	10	45	35

За втратою маси зразків внаслідок зношування наплавленої поверхні закріпленим і незакріпленим абразивом встановили, що горизонтальна вібрація підвищує зносотривкість (див. таблицю). За зношування закріпленим абразивом втрата маси зразків, наплавлених без вібрації, становила 0,035 g, а за горизонтальної вібрації амплітудою 70 та 300 μm – 0,03 та 0,015 g відповідно.

Характер пошкоджень на поверхні наплавлених шарів після тертя також добре узгоджується з втратами маси зразків. За зношування закріпленим абразивом на поверхні тертя шарів, наплавлених без вібрації (рис. 4a), виявили доволі глибокі паралельні канавки та сліди від заевтектичних боридів (FeCr)₂B, які викришувалися з матриці під час тертя та усувалися із зони контакту, утворюючи канавки. З цим пов'язали низький опір зношуванню наплавленого металу.

У зоні контакту абразивного круга з металом, наплавленим за горизонтальної вібрації амплітудою 300 μm , практично не було крихких відколів, спричинене-

них викришуванням заевтектичних боридів (рис. 4b), адже вони за такого режиму наплавлення дуже дрібні. Але на поверхні наплавленого шару спостерігали неглибокі, дрібні і нерівномірно розташовані подряпини від тертя. За наплавлення з використанням вертикальної вібрації на поверхні тертя виявили глибокі і широкі паралельні сліди зношування та викришування складнолегованих боридів (рис. 4c), з якими власне і пов'язали істотне зростання зносу через поглиблення канавок частинками боридів.

За зношування незакріпленим абразивом шарів, наплавлених без вібрації, основним його механізмом стає викришування твердих боридів (рис. 4d), причому незакріплений абразив суттєво сприяє цьому. За наплавлення з використанням горизонтальної вібрації в структурі металу виділяються дрібні вclusions ферохромистого бориду, які ускладнюють зношування через їх малі розміри ($2...5 \mu\text{m}^2$). Як наслідок, знос також зменшується, а на поверхні зношування спостерігали лише неглибокі вищербини від цих включень і подекуди спричинені ними канавки (рис. 4e).

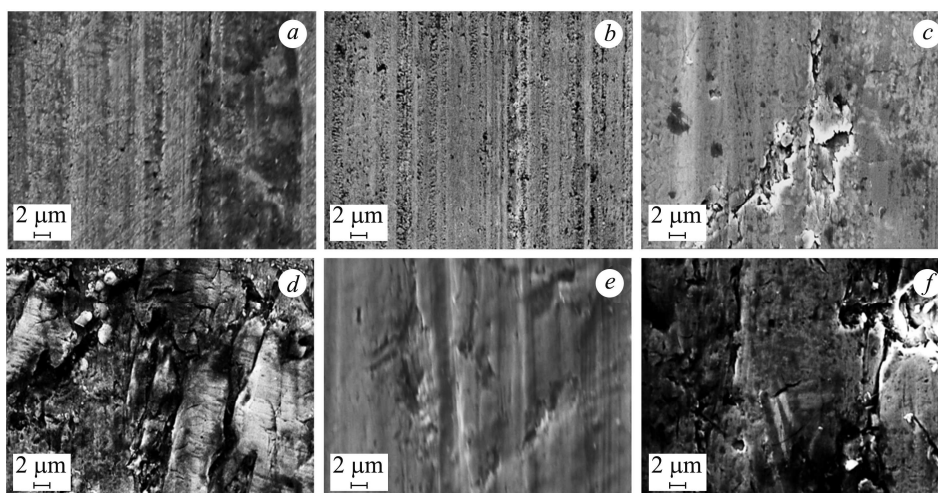


Рис. 4. Морфологічні особливості поверхонь тертя за зношування закріпленим (a–c) і незакріпленим (d–f) абразивом металу, наплавленого ПД Х10Р4Г2С без застосування вібрації (a, d) та з горизонтальною (b, e) і вертикальною (c, f) вібрацією зразків з амплітудою 300 μm .

Fig. 4. Morphological features of the friction surfaces after fixed (a–c) and unfixed (d–f) abrasive wear test of the cladding metal, obtained by welding with CW Cr10P4Mn2C cored wire without vibration (a, d) and with horizontal (b, e) and vertical (c, f) vibration of specimens with an amplitude of 300 μm .

У результаті дослідження впливу вертикальної вібрації під час формування наплавлених шарів на їх зношування незакріпленим абразивом виявили, що поверхня зношування наплавлених шарів за амплітуди коливання 300 μm характеризується численними слідами викришування твердих боридів. Внаслідок їх локального різального ефекту вони полишають глибокі борозенки на поверхні тертя (рис. 4f). Разом з тим, якщо порівняти рельєфи поверхонь зношування наплавлених шарів без вібрації та після вертикальної вібрації, то стає очевидним, що не глибина канавок від тертя в зоні контакту круга з металом, а об'єм слідів та опір відколюванню боридів внаслідок дії абразивних частинок є визначальними ознаками зносу. І що більші за розмірами бориди та менший їх опір відколюванню від матриці, то більший знос наплавленого металу під час випроб незакріпленим абразивом.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що вібрація робочого стола з амплітудою 70 та 300 μm і частотою 100 Hz за електродугового наплавлення захисних шарів із ПД Х10Р4Г2С сприяє диспергуванню структури металу, причому за горизонтальної вібрації інтенсивніше, ніж за вертикальної. Це дає змогу підвищити мікротвердість наплавленого шару від 650 до 870...910 HV та, як наслідок, його абразивну зносостійкість у 2–2,5 рази.

РЕЗЮМЕ. Исследовано микроструктуру наплавленных слоев с порошковой проволоки ПД Х10Р4Г2С. Установлено фазовым анализом и подтверждено спектральным, наличие в структуре наплавленного слоя включений Fe_2B и $(\text{FeCr})\text{B}$, распределенных на фоне матрицы (твердый раствор FeCr). Без применения вибрации во время наплавки размеры боридов изменялись от 10 до 150 μm^2 (в центре валиков) и 50...300 μm^2 (в зоне перекрытия наплавленных слоев). Использование во время наплавки горизонтальной вибрации амплитудой 300 μm приводит к максимальному измельчению фаз $(\text{FeCr})\text{B}$ и Fe_2B (до 2...5 μm^2) как в центре валиков, так и в зоне их перекрытия, что повышает микротвердость наплавленных слоев и положительно влияет на их абразивную износостойкость. Потери массы при износе закрепленным и незакрепленным абразивом уменьшаются в 2–2,5 раза.

SUMMARY. The microstructure of cladding layers obtained by welding with CW Cr10P4Mn2C cored wire was investigated. The presence of the Fe_2B and $(\text{FeCr})\text{B}$ inclusions distributed on the background of the matrix (FeCr solid solution) in the cladding layer microstructure was confirmed by the phase and spectral analyses. When no vibration was used in welding, the borides sizes changed from 10 to 150 μm^2 (in the centre of the roller) and 50...300 μm^2 (in the zone of overlapping deposited layers). The maximum effect of the $(\text{FeCr})\text{B}$ and Fe_2B phases grinding (about 2...5 μm^2 in the centre of the rollers and in their overlapping zone) was obtained under horizontal vibration during welding with amplitude $\sim 300 \mu\text{m}$. As a result, the microhardness values of the cladding layers increased and their abrasive wear resistance improved too. The weight losses in fixed and unfixed abrasive tests decreased in 2–2.5 times.

1. *Effect of carbidesize in hardfacing on abrasive wear* / R. Choteborsk'y, P. Hrabе, M. Müller, R. Válek, J. Savková, M. Jirka // Res Agric Eng. – 2009. – № 55. – P. 49–58.
2. *Yuksel N. and Sahin S. Wear behavior–hardness–microstructure relation of Fe–Cr–C and Fe–Cr–C–B based hardfacing alloys* // Materials and Design. – 2014. – № 58. – P. 491–498.
3. *Understanding the solidification and microstructure evolution during CSC-MIG welding of Fe–Cr–B-based alloy* / A. Sorour, R. Chromik, I. H. Gauvin, M. Brochu // Material characterization. – 2013. – № 86. – P. 127–138.
4. *Improving microstructure and wear resistance of plasma clad Fe-based alloy coating by a mechanical vibration technique during cladding* / S. Wanga, H. Li, X. Chenb, J. Chia, M. Li, L. Cha, H. Xua // Mater. Sci. and Eng. – 2010. – № A 528. – P. 397–401.
5. *Влияние вибраций детали в процессе наплавки на структуру и свойства металла* / Ch V. Pul'ka Ch, O. N. Shablyy, V. S. Senchyshyn, M. V. Sharik, H. N. Hordan // Automatic welding. – 2012. – **705**, № 1. – P. 27–29.
6. *Особливості формування та руйнування наплавлених шарів з порошкових дрітків системи Fe–Cr–B–C за ударних навантажень* / А. А. Войтович, Г. В. Похмурська, М. М. Студент, О. З. Студент // Проблеми трибології. – 2015. – № 4. – С. 114–123.

Одержано 04.12.2015