

УДК 621.791.927.5:669.018.25

Присяжнюк П.М., д.т.н., проф.; Коржов А.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

**ДЕФОРМАЦІЙНЕ ЗМІЦНЕННЯ НАПЛАВЛЕНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ
ВИСОКОМАРГАНЦЕВОЇ СТАЛІ, АРМОВАНОЇ КОМПЛЕКСНИМИ
КАРБИДАМИ, ЯК МЕХАНІЗМ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ В УМОВАХ
УДАРНО-АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ**

Анотація. Розглянуто механізм деформаційного зміцнення наплавленого покриття системи Fe–Ti–Nb–Mo–V–C в умовах ударно-абразивного навантаження. Показано, що комплексний твердий розчин зі структурою NaCl складу $(\text{Ti}_{0.3}\text{Nb}_{0.3}\text{Mo}_{0.3})\text{C}$ у матриці марганцевого аустеніту забезпечує поєднання дисперсійного та деформаційного зміцнення, що призводить до підвищення твердості від ~47 до ~57 HRC безпосередньо в процесі експлуатації. Визначено економічну ефективність відновлення роторів дробарок наплавленням порівняно з їх заміною в умовах відновлення інфраструктури України.

Ключові слова: наплавлення, карбідні фази, марганцевий аустеніт, деформаційне зміцнення, ударно-абразивне зношування, відновлення роторів.

Prysyazhnyuk P.M., Korzhov A.V.

**DEFORMATION HARDENING OF HARDFACED COATINGS BASED ON HIGH-
MANGANESE STEEL REINFORCED WITH COMPLEX CARBIDES AS A
MECHANISM OF WEAR RESISTANCE ENHANCEMENT UNDER IMPACT-
ABRASIVE CONDITIONS**

Abstract. The deformation hardening mechanism of Fe–Ti–Nb–Mo–V–C hardfaced coating under impact-abrasive loading is analyzed. The complex carbide solid solution $(\text{Ti}_{0.3}\text{Nb}_{0.3}\text{Mo}_{0.3})\text{C}$ with NaCl structure in manganese austenite matrix provides combined dispersion and deformation strengthening, increasing hardness from ~47 to ~57 HRC during service. The economic efficiency of crusher rotor restoration by hardfacing versus replacement is assessed in the context of Ukraine infrastructure reconstruction.

Keywords: hardfacing, carbide phases, manganese austenite, deformation hardening, impact-abrasive wear, rotor restoration.

Ключовою проблемою при виборі матеріалів для відновлення деталей дробарок є поєднання суперечливих вимог: висока твердість (абразивна стійкість) та достатня в'язкість (опір сколюванню при ударних навантаженнях). Традиційні хромисті наплавочні сплави забезпечують твердість 55–65 HRC, проте мають критично низьку ударну в'язкість [1]. Навпаки, наплавлення чистою сталлю Гадфільда (Г13) дає задовільну в'язкість, але недостатню початкову твердість (~20 HRC), яка підвищується лише за умов значного пластичного деформування [2].

Альтернативним підходом є формування композитного покриття з аустенітною матрицею, здатною до деформаційного зміцнення (TRIP/TWIP-ефекти), армованою дисперсними частинками твердих фаз. Такий підхід реалізований у сплаві системи Fe–Ti–Nb–Mo–V–C з позначенням 360G15M6B6T3C3F, де матрицею слугує марганцевий аустеніт (~15,5 мас.% Mn), а зміцнювальною фазою – комплексний карбідний твердий розчин $(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Mo})\text{C}$ зі структурою NaCl [3].

Висока мікротвердість карбідних включень (>20 ГПа) при середньому розмірі ~3 мкм забезпечує ефективну протидію проникненню абразивних частинок за механізмом

дисперсійного зміцнення [4]. Водночас аустенітна матриця з вмістом Mn $\approx 15,5$ мас.% характеризується зниженою енергією дефектів пакування (ЕДП), що сприяє інтенсивному двійникуванню та $\gamma \rightarrow \epsilon$ мартенситному перетворенню при ударних навантаженнях.

На відміну від чистої сталі Гадфільда, де деформаційне зміцнення реалізується лише при достатньо високих контактних тисках (>300 МПа), наявність карбідних частинок у покритті 360G15M6B6T3C3F створює локальні концентратори напружень навколо включень. Це ініціює двійникування та мартенситне перетворення навіть при відносно помірних ударних навантаженнях, характерних для умов подрібнення піщано-гравійних сумішей.

Таким чином, синергія двох механізмів – дисперсійного зміцнення частинками $(\text{Ti}_{0.3}\text{Nb}_{0.3}\text{Mo}_{0.3})\text{C}$ та деформаційного зміцнення матриці – зумовлює підвищення твердості покриття від ~ 47 HRC у стані після наплавлення до ~ 57 HRC після робочого наклепу [3]. Це перевищує показники стандартних наплавочних сплавів на основі сталі Гадфільда приблизно на 10 HRC при збереженні задовільної в'язкості системи [5].

Практичне застосування наплавочного сплаву 360G15M6B6T3C3F було апробовано при відновленні роторів із сталі Гадфільда дробарки PULVOMATIC серії 1145 (Іспанія) в умовах подрібнення піщано-гравійних сумішей з початковим гранулометричним складом 25–150 мм у щєбінь фракції 5–20 мм при продуктивності ≈ 60 т/год [3].

Економічну доцільність відновлення роторів наплавленням порівняно з їх заміною пропонується оцінювати через питомі витрати на тонну переробленого матеріалу:

$$C = (C_p + n \cdot C_n) / (n \cdot Q),$$

де C_p – вартість нового ротора (≈ 6000 євро); C_n – вартість одного відновлення наплавленням; n – кількість відновлень між заміною ротора; Q – ресурс ротора між відновленнями (тис. т переробленого матеріалу).

При ресурсі ротора до відновлення ~ 15 тис. т і можливості 3–4 відновлень, питомі витрати на переробку 1 т матеріалу знижуються у 2,5–3 рази порівняно з режимом повної заміни роторів. Цей ефект особливо актуальний в умовах відновлення інфраструктури України: попит на дроблені матеріали (щєбінь, гравій) суттєво зріс, тоді як логістика імпортованих запасних частин ускладнена [6].

Додатковою перевагою є можливість виконання відновлювальних робіт безпосередньо на місці експлуатації дробарки – у кар'єрі або на будівельному майданчику – без демонтажу та транспортування обладнання, що скорочує непродуктивні простой.

1. Деформаційне зміцнення покриття системи Fe–Ti–Nb–Mo–V–C в умовах ударно-абразивного навантаження обумовлене синергією дисперсійного зміцнення карбідними частинками $(\text{Ti}_{0.3}\text{Nb}_{0.3}\text{Mo}_{0.3})\text{C}$ та деформаційного зміцнення марганцевоаустенітної матриці за TRIP/TWIP-механізмами.

2. Підвищення твердості від ~ 47 HRC (після наплавлення) до ~ 57 HRC (після наклепу) є наслідком ініціювання двійникування та мартенситного перетворення локальними концентраторами напружень навколо карбідних включень, що робить процес зміцнення ефективнішим порівняно з нелегованою сталлю Гадфільда.

3. Застосування технології відновлення наплавленням сплавом 360G15M6B6T3C3F знижує питомі витрати на переробку будівельних матеріалів у 2,5–3 рази, що є особливо важливим в умовах відновлення інфраструктури України.

Перелік посилань

1. Ge S., Wang Q., Wang J. The impact wear-resistance enhancement mechanism of medium manganese steel and its applications in mining machines. *Wear*. 2017. Vol. 376–377, Part B. P. 1097–1104. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.015>
2. Varela L.B., Tressia G., Masoumi M. et al. Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur? *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 122, art. no. 105295. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105295>
3. Prysyzhnyuk P., Bembenek M., Drach I. et al. Restoration of the Impact Crusher Rotor Using FCAW with High-Manganese Steel Reinforced by Complex Carbides. *Management Systems in Production Engineering*. 2024. Vol. 32, No. 2. P. 294–302. <https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0028>
4. Bembenek M., Prysyzhnyuk P., Shihab T. et al. Microstructure and Wear Characterization of the Fe–Mo–B–C Based Hardfacing Alloys Deposited by Flux-Cored Arc Welding. *Materials*. 2022. Vol. 15, art. no. 5074. <https://doi.org/10.3390/ma15145074>
5. Prysyzhnyuk P., Ivanov O., Matvienkiv O. et al. Impact and abrasion wear resistance of the hardfacings based on high-manganese steel reinforced with multicomponent carbides of Ti–Nb–Mo–V–C system. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.014>
6. Prysyzhnyuk P., Molenda M., Romanyshyn T. et al. Development of a hardbanding material for drill pipes based on high-manganese steel reinforced with complex carbides. *Acta Montanistica Slovaca*. 2022. Vol. 27. P. 685–696. <https://doi.org/10.46544/AMS.v27i3.09>