

В. І. Савуляк<sup>1</sup>  
М. С. Дмитрієв<sup>1</sup>  
В. Й. Шенфельд<sup>1</sup>  
К. С. Шаргородський<sup>1</sup>

## ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПОКРИТТЯ, ЯКІ НАПЛАВЛЕНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ГНУЧКИХ ЕЛЕКТРОДНИХ СТРІЧОК

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Розглянуто можливість отримання на поверхнях деталей зі сплавів заліза зносостійких покриттів значної товщини шляхом їхнього наплавлення дугою в середовищі захисних газів. При цьому використовується поширений низьковуглецевий зварювальний дріт, а твердість, зносостійкість та інші властивості покриття забезпечуються використанням нанесеної на поверхню, що зміцнюється, гнучкої електродної стрічки. Запропонована стрічка складається з тканини з матеріалів органічного походження, на яку нанесено потрібну суміш легувальних порошків зі спеціальним клеєм. Під час горіння дуги між зварювальним дротом та заготовкою утворюється зварювальна ванна. У цій ванні розчиняється вуглець органічної тканини стрічки та комплекс із суміші нанесених легувальних порошків з подальшим утворенням твердих зносостійких сполук у покритті. Це дає змогу утворювати покриття високої твердості на низьковуглецевих сталях без використання додаткової операції — термообробки. Додатковим позитивним ефектом є можливість подрібнення структури поверхневого шару, наплавлення криволінійних поверхонь та отворів з твердістю та зносостійкістю відповідно до локальних навантажень. Виконано порівняльний аналіз результатів наплавлення без та з використанням гнучкої електродної стрічки. Валики та форма утворених покриттів суттєво не відрізняються у цих способах наплавлення. Показано вигляд та описано будову використаної гнучкої електродної стрічки. Встановлено, що запропонована технологія наплавлення дозволяє підвищити твердість поверхні низьковуглецевих сталей звичайної якості, отримати дрібнозернисту структуру, змінювати локальну твердість покриття за вимогами. Експериментально доведена розчинність у зварювальній ванні вуглецю, що міститься в тканинах з матеріалів органічного походження та нанесених на неї легувальних порошків. Виявлено, що формування покриттів з різними властивостями залежить від товщини використаної тканини та складу нанесеного комплексу легувальних елементів.*

**Ключові слова:** гнучка електродна стрічка, наплавний валик, покриття, робоча поверхня, твердість, мікроструктура.

### Вступ

Значна кількість машин виходить з ладу внаслідок зношування робочих поверхонь. При цьому спостерігається нерівномірність локалізації зносу.

Незважаючи на те, що відсоток зношених поверхонь невеликий, деталі та вузли машин втрачають свою працездатність або продуктивність. У промисловості накопичено значний досвід підвищення зносостійкості поверхонь. У переважній більшості застосовують методи термічної обробки [1], хіміко-термічної обробки [2] та нанесення зносостійких покриттів [3], [4]. Характерною особливістю цих методів є отримання окремих поверхонь або навіть деталей в цілому підвищеної твердості та зносостійкості. Але використання більшості методів вимагає використання дорогих легованих металів, час їхнього виконання тривалий, який може вимірюватись десятками годин, при цьому глибина зміцнення поверхні — невелика [2]. Практично відсутні роботи з новітніми технологіями, які б дозволяли забезпечувати рівномірність зношування робочих поверхонь, не зважаючи на суттєву різницю в локальних навантаженнях. Актуальною є також задача створення робочих органів

машин з реалізацією механізму самогострювання, що дозволить значно підвищити ресурс деталей та механізмів без додаткових затрат. Окрему задачу для зміцнення створюють робочі поверхні, що мають криволінійну форму, внутрішні поверхні отворів, на які складно наносити покриття або здійснювати термічну обробку.

На рис. 1а показано приклад нового шнека для пресування паливних брикетів, а на рисунку 1б його стан після виконання певного обсягу робіт. Знос останнього витка призводить до значного підвищення тисків в зоні пресування, збільшення тертя та зношування, що прогресує. Супутнім негативним ефектом є значне підвищення температури в зоні пресування, яке викликає обвуглювання деревини та втрату твердості шнека.



Рис. 1. Приклад деталей з нерівномірним зношуванням: *a* — приклад нового пресувального шнека; *б* — приклад зношеного пресувального шнека

У роботі розглядається можливість використання гнучкої електродної стрічки для забезпечення потрібних властивостей з протидії зносу шляхом наплавлення покриттів. З цією метою ця стрічка закріплюється на зміцнюваній поверхні, а потім по ній виконується наплавлення зварювальним дротом в середовищі захисного газу. Легувальні компоненти на стрічці можуть бути нанесені рівномірно або за певним законом і з різною концентрацією та складом. Можливо також нанесення легувальних стрічок у декілька шарів. Легувальна стрічка розчиняється у зварювальній ванні, легує метал та бере участь у структуроутворенні. Це дозволяє розв'язати актуальне наукове завдання не тільки компенсації зносу в процесі відновлення зношених поверхонь, але й забезпечити рівномірність зношування поверхонь, які сприймають суттєво нерівномірні локальні навантаження.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблеми зношування деталей та збільшення їхньої довговічності висвітлено в низці досліджень та публікацій [5]—[7]. Особлива увага приділяється конструкціям та ефективності обладнання для виготовлення паливних брикетів [8]. Стурбованість викликає недостатня довговічність машин для пресування, тому виробники різними методами намагаються це зробити, як от в роботі [9] розглядається варіант повної заміни деталі, яка виготовлена токарним методом з конструкційної сталі 45 та подальшою термічною обробкою. Це рішення подовжує термін служби машини в цілому, але не вирішує питання зносу та схоплювання металу на витках. Також велика увага приділяється факторам [10], які впливають на зношування, та важливій ролі сумісності матеріалів деталей. В роботі [11] розглядаються варіанти подовження довговічності методом додавання присадкового матеріалу у вигляді дроту або стрічки, оболонка яких складається з низьковуглецевої сталі та осердя із суміші порошків. Цей метод відстрочує зношування витків, виготовлення та впровадження у виробництво такої стрічки є невигідним та збільшуватиме собівартість продукції на виході.

У більшості випадків виробники шукають швидкі та економічні способи відновлення зношених деталей зі збільшенням терміну служби. Для зміцнення або відновлення у патенті на корисну модель [12] пропонується спеціальний електрод для наплавлення робочих поверхонь з утворенням високовуглецевих покриттів. Але такий електрод не дозволяє наплавити покриття, яке б мало змінну твердість та зносостійкість у відповідності до локальних навантажень.

У патенті [13] запропоновано спосіб електродугового наплавлення на поверхню металевих виробів. Наплавлення відбувається після того, як на робочу поверхню нанесли та зафіксували вуглецевмісний матеріал у вигляді волокон, чи тканини, за допомогою суспензії з рідкого скла та суміші легувальних елементів. В дослідженні про нанесення покриття з використанням органічних підкладок розглянуто технологію відновлення робочих поверхонь деталей шляхом введенням у зону наплавлення органічних матеріалів на основі целюлози як джерела вуглецю. Цей метод суттєво підвищив твердість поверхневих шарів та подрібнив структуру, що позитивно вплинуло на зносостійкість [14]. Складнощі викликає необхідність нанесення легувальної шихти у потрібних

концентраціях безпосередньо на поверхні деталі, які потрібно зміцнити або відновити.

У статті [15] розглянуто способи модифікування та мікролегування наплавленого металу. Йдеться про огляд хімічних та фізичних способів модифікування та технології введення добавок для модифікування:

- введення модифікаторів, що містяться в шихті порошкових дротів, через електричну дугу;
- застосуванням «мікрохолодильників»;
- застосуванням додаткового електродного або присадного дроту;
- застосуванням додаткових присадок, які розташовуються безпосередньо на виробі, що зварюється або наплавляється.

У статті обговорюється відмінність термінів «модифікування» та «мікролегування», та зазначається про необхідність застосування елементів-модифікаторів вищої температури плавлення металу, використовуючи шихту електродних дротів.

*Метою роботи є підвищення зносостійкості деталей завдяки наплавленням їхніх робочих поверхонь в середовищі захисних газів із застосуванням гнучких електродних стрічок, а також реалізації при цьому принципу забезпечення рівномірного зносу по всій робочій поверхні в умовах нерівномірного навантаження.*

### Виклад основного матеріалу

Для дослідження використано прямокутний зразок, вирізаний з металевого листа товщиною 8 мм зі сталі Ст. 3. Зразок встановлювався на верстат для наплавлення в середовищі захисних газів УД-209М. На поверхню зразка послідовно спочатку наплавлявся еталонний валик обмідненим зварювальним дротом Св08Г2С діаметром 1,2 мм в у середовищі захисного газу  $\text{CO}_2$ , який використовувався для порівняння з іншими валиками, що наплавлялись в інших умовах (рис. 2). Після цього на уже гарячу пластину наплавлялось ще три валика по попередньо встановленій легувальній електродній стрічці (рис. 3).

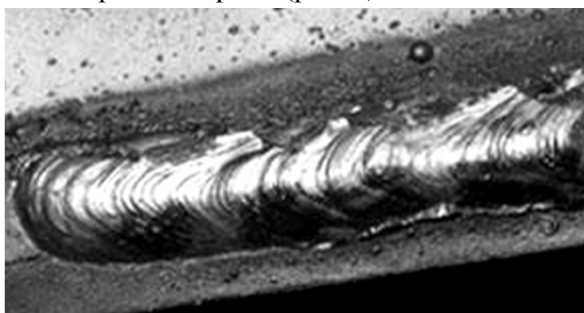


Рис. 2. Еталонний наплавлений валик



Рис. 3. Наплавлені валики з легувальною стрічкою

Наплавлення еталонного валика дротом Св08Г2С без легування проведено у сталих режимах: сила струму 105 А; швидкість подачі дроту 113 м/год.; швидкість руху наплавної головки 7,2 м/хв. В подальшому для легування валиків та утвореного покриття (рис. 3) використали гнучку електродну стрічку (рис. 4). Наплавлення в цьому випадку виконувалось тим самим дротом у режимах: сила струму 105 А; швидкість руху наплавної головки 3,8 м/хв, швидкість подачі дроту 113 м/год.



Рис. 4. Приклад гнучкої електродної стрічки

Після проведення операції наплавлення, зразки охолоджуються на повітрі за кімнатної температури, наплавлену поверхню з валиками очищують від крапель металу та окислів.

Гнучка електродна стрічка виготовлена на основі тканини з матеріалів органічного походження, на яку нанесена суспензія з легувальних порошків та спеціального клею. Для основи стрічки

використано звичайна джинсова тканина товщиною 1 мм з вмістом бавовни 95 % та еластану 5 %. Ця тканина виконує дві функції: слугує основою для виготовлення гнучкої електродної стрічки та є джерелом вуглецю. Кількість вуглецю, який надходить у наплавлену поверхню, може регулюватися шляхом використання тканин різної товщини або встановленням їх з потрібною кількістю шарів. В основу суспензії для цього дослідження ввійшло три порошки легувальних компонентів: ферохром (FeCr — 70%), ферованадій (FeV — 45%), феромолібден (FeMo — 60%) та клей CR3301, який поєднує всі компоненти, а після висихання смужка на основі тканини зберігає достатню еластичність.

Наплавлення еталонного зразка за вказаною вище технологією дозволило встановити, що процес нанесення валика на використаному обладнанні з вказаними режимами відбувається стабільно, а твердість і структура валика відповідають характерним значенням для електродного дроту Св08Г2С. Спостерігається помірне розбризування металу крапельками розміром від 0,2 до 2 мм по поверхні зразка. Наплавлений валик рівномірний, шириною близько 10 мм та висотою 2...3 мм, основний метал проплавився на глибину до 2 мм, кут змочування достатній та не перевищує 90°, тому немає підрізів, а форма валика овальна.

Зовнішнє дослідження валиків, наплавлених по гнучкій електродній стрічці, показало, що їхні геометричні параметри мають незначні відхилення від параметрів еталонного валика, виявлена деяка кількість утвореного шлаку внаслідок часткового згорання і одночасно часткового розчинення у зварювальній ванні гнучкої електродної стрічки. Зовнішні розміри валика: висота 4...5 мм, ширина 7...8 мм, проплавлення основного металу відбулося до 4 мм. Менша ширина наплавного валика у порівнянні з еталонним пояснюється зменшенням змочування між рідким металом зварної ванни та поверхнею зразка. Ймовірно процесу розтікання рідкого металу перешкоджає використаний для фіксації гнучкої електродної стрічки клей CR3301. Спостерігається незначне розбризування металу з дрібними краплями діаметром 0,1...1 мм.

Процеси наплавлення, розчинення гнучкої електродної стрічки, легування наплавного шару металу відбуваються без значних відхилень, але супроводжується деяким потріскуванням.

Дослідження мікроструктури проводилось на спеціально підготовлених мікросліфах, зрізаних перпендикулярно до наплавлених валиків, на мікроскопі МІМ 8. Встановлено, що метал еталонного валика має ферито-перлітну мікроструктуру. Спостерігається поєднання зерен фериту у блоки, як показано стрілками на рис. 5а. Видозміна структури відбулась внаслідок термічного впливу наступних наплавлених валків.

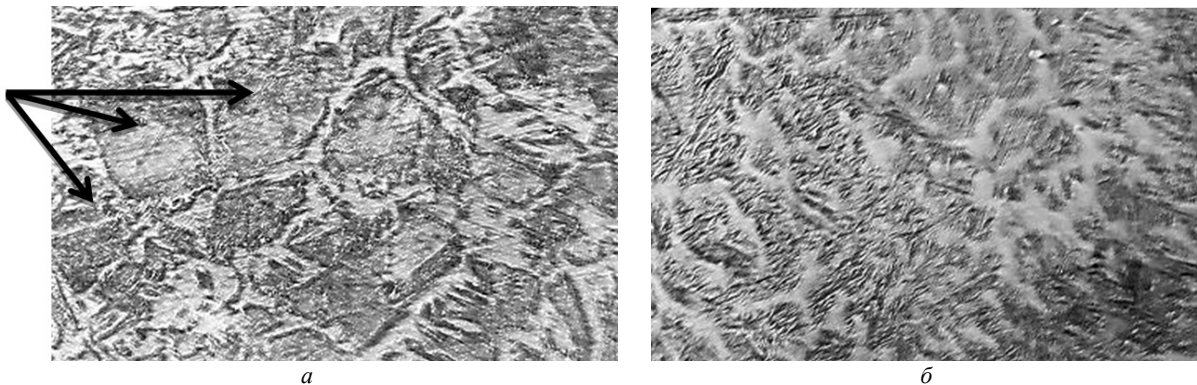


Рис. 5. Приклади отриманих мікроструктур: а — еталонного нелегованого валика; б — валика, легованого через гнучку електродну стрічку

Дослідження валика (рис. 5б), який наплавляли з використанням гнучкої електродної стрічки, виявило утворення ферито-мартенсито-перлітної мікроструктури внаслідок розчинення легувальних елементів та вуглецю з тканини в зварювальній ванні.

У цій структурі переважає перліт, а мартенсит поступово зникає ближче до перехідної зони між наплавленим металом та основою. Перехідна зона має дрібнозернисту структуру фериту та перліту без мартенситу. Дефектів сплавлення не спостерігається.

На рис. 6 показано зразок, наплавлений з використанням гнучкої електродної стрічки. На поверхні шліфа спостерігаються сліди від уколів алмазного індентора твердоміра, які йдуть від поверхні наплавного валика до основи (внизу). Невеликий поверхневий шар валика має меншу твердість внаслідок знеуглецювання, яке викликане високою температурою розплаву та кон-

тактом із захисним газом та залишками повітря. Нижче твердість утвореного покриття практично незмінна по всій товщині аж до перехідної зони.

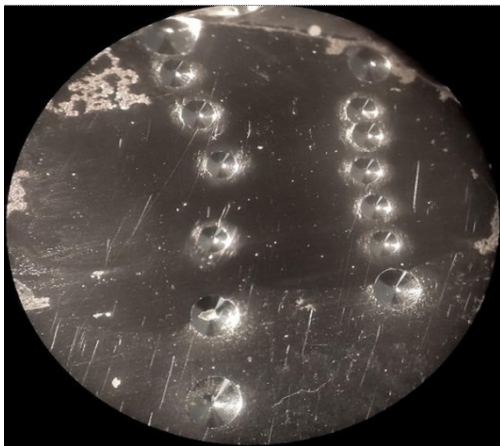


Рис. 6. Вимірювання твердості покриття та перехідної зони

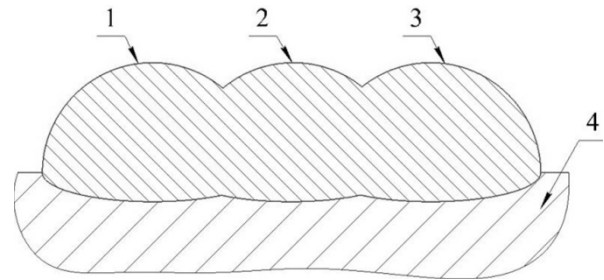


Рис. 7. Схема наплавлених валиків: 1, 2, 3 — порядок наплавлення валиків; 4 — сталевий зразок з сталі Ст. 3

Результати вимірювання твердості валиків, наплавлених зварювальним дротом по гнучкій електродній стрічці, показані на рис. 8.

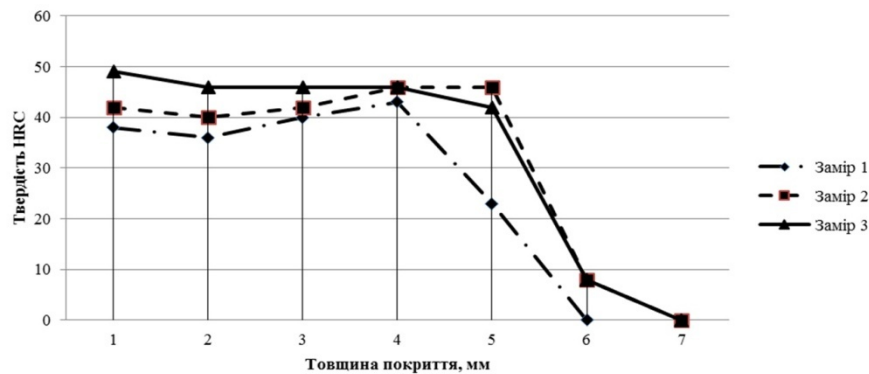


Рис. 8. Твердість наплавленого покриття по товщині

Аналізуючи показники твердості наплавлених валиків виявлено таке. Для першого наплавленого валика, «валик 1», середня твердість коливається в межах 38-40 HRC. На другому наплавленому валику «валик 2» показник середньої твердості коливався в межах 40-42 HRC, при цьому максимальна твердість 46 HRC спостерігається на глибині, ближче до основного металу. Це пояснюється розташуванням електродної стрічки та швидким тепловідведенням у матеріал зразка зі сталі Ст. 3. На третьому наплавленому валику «валик 3» спостерігається максимальна твердість до 49 HRC, середнє значення твердості по глибині становить 46 HRC. Цей валик наплавлявся останнім і його метал відпущений від тепла зварювальних ванн. А попередні валики виявляються відпущеними від тепла наплавлення кожного наступного валика, що вимагає врахування в технології.

Збільшення твердості до вищеписаних значень зумовлене структуроутворенням легованого покриття та появи деякої кількості карбідів внаслідок збільшення кількості вуглецю від розчинення тканини стрічки.

## Висновки

1. Встановлена можливість наплавлення на поверхнях деталей з низьковуглецевих сталей покриттів високої твердості без термообробки (гартування), а лише використовуючи легування через розчинення у зварювальній ванні вуглецю тканини та нанесеного на гнучку електродну стрічку комплексу легувальних елементів.

2. В залежності від товщини використаної тканини та складу нанесеного комплексу легувальних елементів можна створювати покриття з різними властивостями.

3. Застосування гнучкої електродної стрічки дозволяє подрібнити розмір зерен покриття, що позитивно впливає на його фізико-механічні властивості.



4. Режимми нанесення покриттів з використанням гнучкої електродної стрічки потребують корегування, що вимагає проведення подальших досліджень.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] М. В. Любін, і О. А. Токарчук, «Вплив хіміко-термічної обробки інструменту на процес виготовлення метричних різей у важкооброблюваних сталях,» *Вібрації в техніці та технологіях*, № 1 (92), с. 48-55, 2019.
- [2] V. G. Pysarenko, “The combined chemic-thermal processing as a way of increase of durability of details of exact mechanics,” *Problems of Tribology*, no. 60 (2), pp. 75-78, 2014. [Electronic resource]. Available: <https://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/334>.
- [3] Л. А. Тимофеева, Л. В. Волошина, і П. М. Гордієнко, «Аналіз технологічних параметрів процесу нанесення зносостійкого покриття,» *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, Харків, вип. 170, с. 13-19, 2017.
- [4] Л. С. Кривчик, Т. С. Хохлова, Л. М. Дейнеко, В. Л. Пінчук, і В. О. Столбовий, «Зміцнення трубного інструменту шляхом проведення комбінованої обробки — іонного азотування з нанесенням зносостійких покриттів,» *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід, матеріали IV Міжнар. конф. Гельсінкі*, 6-8 грудня, 2021 р. Дніпро-Гельсінкі, 2021, с. 186-199.
- [5] V. A. Voitov, and B. M. Tsybmal, “Tribology compatibility of steel and cast iron in abrasive and corrosive environment in the production of biomass briquettes,” *Проблеми тертя та зношування*, № 4, с. 13-26, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptz\\_2016\\_4\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptz_2016_4_4).
- [6] В. В. Аулін, і В. Ф. Лисенко, *Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах*, м. Кіровоград, 2014, 369 с.
- [7] К. В. Борак, «Забезпечення рівності зношування робочих органів ґрунтообробних машин,» *Наукові праці ВНТУ*, № 1, 2022. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2022-1-19-30>.
- [8] *Шнековий прес для тирси pini-kay стаття особливості шнекового пресування*, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://jak.bono.odessa.ua/articles/shnekovij-pres-dlja-tirsi-pini-kay-stattja.php>.
- [9] А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов, і З. А. Реута, «Забезпечення продуктивності виготовлення паливних брикетів PiniKaу за рахунок модернізації робочої частини пресу ПШ-250,» *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*, № 4 (10), с. 36-42, 2021. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.04.05>.
- [10] В. А. Войтов, і Б. М. Цимбал, «Експериментальна оцінка впливу факторів на зношування та сумісність матеріалів деталей екструдера,» *Проблеми трибології (Problems of Tribology)*, с. 90-99, 2016.
- [11] Д. Л. Луцак, О. В. Пилипченко, і М. Й. Бурда, «Зміцнення робочих органів обладнання для виготовлення паливних брикетів та гранул,» *Проблеми трибології (Problems of Tribology)*, с. 19-25, 2015.
- [12] В. І. Савуляк, В. Й. Шенфельд, О. В. Шаповалова, і А. Ю. Осадчук, *Електрод*. Вінницький національний технічний університет, 2011. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uapatents.com/2-57720-elektrod.html>.
- [13] В. І. Савуляк, В. Й. Шенфельд, О. В. Шаповалова, і А. Ю. Осадчук, *Спосіб електродугового наплавлення на поверхню металевих виробів*. Вінницький національний технічний університет, 2010. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uapatents.com/2-52753-sposib-elektrodugovogo-naplavlennya-na-poverkhnju-metalevikh-virobiv.html>.
- [14] В. І. Савуляк, В. Й. Шенфельд, і О. П. Шиліна, «Наплавлені покриття з використанням органічних підкладок,» *Проблеми тертя та зношування*. Вінниця: ВНТУ, 4 (85), с. 83-88, 2019.
- [15] А. А. Бабінець, і І. О. Рябцев, «Класифікація способів модифікування та мікролегування наплавленого металу (огляд),» *Автоматичне зварювання*, Київ: НАН України, ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, с. 3-11, 2021.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 2.04.2023

**Савуляк Валерій Іванович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, e-mail: [korsav84@gmail.com](mailto:korsav84@gmail.com) ;

**Дмитрієв Максим Сергійович** — аспірант кафедри галузевого машинобудування, e-mail: [maxlion1974@gmail.com](mailto:maxlion1974@gmail.com) ;

**Шенфельд Валерій Йосипович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування, e-mail: [leravntu@gmail.com](mailto:leravntu@gmail.com) ;

**Шаргородський Костянтин Сергійович** — аспірант кафедри галузевого машинобудування, e-mail: [konstantinw@ukr.net](mailto:konstantinw@ukr.net).

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. I. Savuliak<sup>1</sup>  
M. S. Dmytriiev<sup>1</sup>  
V. Yo. Shenfeld<sup>1</sup>  
K. S. Sharhorodskiy<sup>1</sup>

## Functional Coatings, Deposited Using Flexible Electrode Tapes

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*The paper considers the possibility of obtaining wear-resistant coatings of considerable thickness on the surfaces of parts made of iron alloys by arc welding in the environment of protective gases. In this case, a common low-carbon welding wire is used, and the hardness, wear resistance and other properties of the coating are ensured by the use of a flexible electrode tape applied to the surface, being strengthened. The offered tape consists of fabric of organic origin, on which the required mixture of doping powders with a special glue is applied. During the arc burning, a welding bath is formed between the welding wire and the workpiece. In this bath, the carbon of the organic fabric of the tape and the complex of the mixture of applied doping powders are dissolved, with the subsequent formation of hard wear-resistant compounds in the coating. This makes it possible to form coatings of high hardness without using an additional operation — heat treatment on low-carbon steels. An additional positive effect is the possibility of grinding the structure of the surface layer, surfacing of the curved surfaces and holes with hardness and wear resistance in accordance with local loads. A comparative analysis of surfacing results was performed without and with the use of a flexible electrode tape. The rollers and the shape of the formed coating do not differ significantly in different surfacing methods. The structure of the used flexible electrode tape is shown and described. It was established that the proposed surfacing technology allows to increase the hardness of the surface, to obtain a fine-grained structure, and to change the local hardness of the coating according to the requirements. The solubility in the welding bath of carbon contained in the fabric of natural origin and applied doping powders has been experimentally proven. It was determined that the creation of the coatings with various properties depends on the thickness of the used fabric and the applied doping complex.*

**Keywords:** flexible electrode tape, surfacing roller, coating, working surface, hardness, microstructure.

**Savuliak Valerii I.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Mechanical Engineering, e-mail: korsav84@gmail.com ;

**Dmytriiev Maxym S.** — Post-Graduate Student of the Chair of Mechanical Engineering, e-mail: maxlion1974@gmail.com ;

**Schenfeld Valerii Yo.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Mechanical Engineering, e-mail: leravntu@gmail.com ;

**Sharhorodskiy Kostiantyn S.** — Post-Graduate Student of the Chair of Mechanical Engineering, e-mail: konstantinw@ukr.net