

## **РОЗРОБЛЕННЯ ЗНОСО- ТА УДАРОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ Fe-Ti-Mn-C ДЛЯ НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ**

**П.М. Присяжнюк, Л.С. Шлапак, Д.Л. Луцак, М.Й. Бурда, А.О. Молчанов, Р.В. Андрусишин**

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: ztk@nimg.edu.ua*

*Наведено результати досліджень зі створення зносостійких покриттів на робочих поверхнях обладнання та інструменту, що працює в умовах інтенсивного абразивного зношування. Основою для створення покриттів слугувала високомарганцева сталь із високою здатністю до деформаційного зміцнення, легована карбідами титану. Покриття наносили шляхом електродугового наплавлення порошковими електродами, шихта яких складалась із феросилікомарганцю, порошку титану, графіту та компонентів, які забезпечують захист дуги від дії атмосфери. Структура розроблених покриттів складається із марганцевого аустеніту та дисперсних включень карбиду титану розмірами ~ 1 мкм. Твердість за методом Роквелла вимірювали на твердомірі ТК-2 (ГОСТ 3882-74) втискуванням алмазного конуса при навантаженні ~ 150 Н (шкала С). Перед вимірюванням твердості проводилось деформування поверхневого наплавленого шару із використанням твердоміру ТШ-2. При цьому як індентор використовувалась твердосплавна кулька діаметром 10 мм, виготовлена за ГОСТ 3722-81. Зусилля втискування становило 3000 кг. Твердість вимірювалась як у лунці, так і поза нею. За різницею твердості розраховували ступінь наклепу. Розроблені покриття характеризуються здатністю до деформаційного зміцнення в умовах пластичної деформації. При цьому встановлено, що твердість деформованих покриттів перевищує твердість покриттів у вихідному стані на понад 57 %. Експериментальні дослідження абразивної зносостійкості за умов тертя по закріпленому абразиву проводились шляхом порівняння розроблених покриттів та серійних матеріалів для наплавлення. Результати порівняння абразивної зносостійкості показали, що розроблені покриття характеризуються зносостійкістю, майже удвічі вищою порівняно із серійними високохромистими сплавами для наплавлення. Зносостійкість покриттів за умов аероабразивної ерозії проводились із використанням відцентрового прискорювача Клейса у середовищі кварцового піску за кутів атаки 30°, 60° та 90°. Результати випробувань показали, що найвища зносостійкість у розроблених покриттів за кута атаки, рівному 90°. Аналіз поверхні покриттів проведений методом електронної мікроскопії показав відсутність слідів крихкого руйнування. Отже, розроблені покриття можуть бути застосовані для підвищення довговічності робочих поверхонь нафтогазового обладнання, яке працює в умовах абразивного зношування.*

**Ключові слова:** електродугове наплавлення, високомарганцева сталь, аероабразивна ерозія, зносостійкість, карбід титану, деформаційне зміцнення.

*Приведены результаты исследований по созданию износостойких покрытий на рабочих поверхностях оборудования и инструмента, работающего в условиях интенсивного абразивного износа. Основой для создания покрытий служила высокомарганцовистая сталь с высокой способностью к деформационному упрочнению, легированная карбидами титана. Покрытие наносили путем электродугового наплавления порошковыми электродами, шихта которых состояла из ферросиликомарганца, порошка титана, графита и компонентов, обеспечивающих защиту дуги от влияния атмосферы. Структура разработанных покрытий состоит из марганцевого аустенита с дисперсными включениями карбида титана с размерами зерен ~ 1 мкм. Твердость измеряли по методу Роквелла с помощью твердомера ТК-2 (ГОСТ 3882-74) путем вдавливания алмазного конуса при нагрузке ~ 150 Н (шкала С). Перед измерением твердости проводилось деформирование поверхностного наплавленного слоя с использованием твердомера ТШ-2. При этом как индентор использовался твердосплавный шарик диаметром 10 мм, изготовленный по ГОСТ 3722-81. Усилие вдавливания составляло 3000 кг. Твердость измерялась как в лунке, так и в недеформированных зонах. По изменению твердости рассчитывали степень наклепа. Разработанные покрытия характеризуются способностью к деформационному упрочнению в условиях пластической деформации. Установлено, что твердость деформированных покрытий превышает твердость покрытий в исходном состоянии более чем на 57%. Экспериментальные исследования абразивной износостойкости в условиях трения по закреплённому абразиву проводились путем сравнения разработанных покрытий и серийных материалов для наплавки. Результаты сравнения абразивной износостойкости показали, что разработанные покрытия характеризуются износостойкостью, высшей по сравнению с серийными высокохромистыми сплавами для наплавки почти в 2 раза. Износостойкость покрытий в условиях аероабразивной эрозии проводились с использованием*

центрбежного ускорителя Клейса в среде кварцевого песка при углах атаки 30°, 60° и 90°. По результатам испытаний наибольшей износостойкостью обладали покрытия, нанесенные при угле атаки, равном 90°. Анализ поверхности покрытий, проведенный методом электронной микроскопии, показал отсутствие следов хрупкого разрушения. Разработанные покрытия могут быть применены для повышения долговечности рабочих поверхностей нефтегазового оборудования, работающего в условиях абразивного износа.

Ключевые слова: электродуговая наплавка, высокомарганцева сталь, абразивная эрозия, износостойкость, карбид титана, деформационное упрочнение

*The paper presents the results of research on the development of wear-resistant coatings on the working surfaces of equipment and tools operating in conditions of intense abrasive wear. Titanium carbide alloyed high-manganese steel with a high strain hardening capacity served as the basis for coatings. The coating was made by electric arc surfacing with powder electrodes, the charge of which consisted of ferrosilicomanganese, titanium powder, graphite, and components that protect the arc from the atmosphere. The coatings consist of manganese austenite and dispersed inclusions of titanium carbide with dimensions of ~ 1 micron. Rockwell hardness was measured by means of TK-2 hardness testers (GOST 3882-74) by indentation of a diamond cone under a load of ~ 150 N (scale C). Before measuring the hardness, the surface deposited layer was deformed using the TS-2 hardness gage. At the same time, a carbide ball with a diameter of 10 mm manufactured according to GOST 3722-81 was used as an indenter. The indentation effort was 3,000 kg. Hardness was measured both in the well and in the undeformed zones. By the difference in hardness, the degree of work hardening was calculated. The developed coatings are characterized by the capacity for strain hardening under plastic deformation conditions. It was found that the hardness of the deformed coatings exceeds the hardness of the coatings in the initial state by 57% higher. Experimental studies of abrasive wear resistance under friction conditions on a fixed abrasive were carried out by comparing the developed coatings and serial materials for surfacing. The results of the comparison of abrasive wear resistance showed that the developed coatings are characterized by wear resistance higher compared to serial high-chromium alloys for surfacing almost 2 times. The wear resistance of coatings under conditions of aero-abrasive erosion was carried out using a Kleis centrifugal accelerator in an environment of quartz sand at angles of attack of 30°, 60° and 90°. The test results showed that the highest wear resistance of the developed coatings was determined at an angle of attack of 90°. Analysis of the surface of the coatings carried out by electron microscopy showed no signs of brittle fracture. The developed coatings can be applied to increase the durability of the working surfaces of oil and gas equipment operating in abrasive conditions.*

Key words: electric arc surfacing, high manganese steel, aeroabrasive erosion, wear resistance, titanium carbide, deformation hardening.

## Вступ

На даний час в Україні більшість бурового інструменту та обладнання для видобутку та переробки корисних копалин є закордонного виробництва. Його експлуатація проводиться за умов інтенсивного абразивного зношування, що призводить до зносу робочих поверхонь. Таким чином, постає необхідність імпорту запасних частин, що потребує значних фінансових затрат. Вирішення вказаної проблеми можливе шляхом створення на його робочих поверхнях зносостійких композиційних поверхневих шарів, які характеризуються універсальністю, тобто можуть застосовуватись для різних умов роботи у широкому діапазоні навантажень. Основною концепцією їх створення є поєднання ударної стійкості високомарганцевої сталі та абразивної зносостійкості надтвердих матеріалів (НТМ) у монолітному матеріалі. При цьому особливо важливе значення має пошук сумісних із високомарганцевою сталлю НТМ, тобто таких, які у процесі електродугового нанесення покриття максимально повно зберігають свої властивості та мінімально впливають на властивості сталі. Це дасть можливість отримати поверхневі шари, у яких при експлуатації най-

більш навантажені ділянки будуть зміцнюватись відповідно до рівня та характеру дії динамічного навантаження, тим самим ефективно протидіяти зношуванню. Таким чином, формується поверхневий шар із композитною будовою, який буде пристосовуватись до конкретних умов роботи.

Розроблено матеріали для підвищення зносостійкості деталей машин на основі карбідів TiC та боридів TiB<sub>2</sub> титану, які є одними з найбільш твердих і тугоплавких сполук, які використовуються в сплавах для наплавлення. Твердість сполук TiC (~ 30 ГПа) і TiB<sub>2</sub> (~ 32 ГПа) є у 2 рази вищою ніж твердість карбідів хрому. Температура плавлення вказаних сполук становить 3150°C і 3193°C відповідно, а їх розчинність в Fe не перевищує ~ 1 мас. %, що робить їх перспективними матеріалами для створення зносостійких покриттів з вираженою гетерофазовою структурою. Крім того, завдяки високій карбідоутворюючій здатності, титан рідко переходить у твердий розчин, що можливо тільки при співвідношенні кількості вуглецю у сталі до кількості титану, меншому ніж 1:4. В такому випадку надлишковий титан утворюва-

тиме титаніди заліза  $Fe_2Ti$ , які також підвищують твердість сталі.

### **Мета роботи**

Полягала у створенні економнолегованого порошкового електродного матеріалу для підвищення надійності обладнання, що експлуатується в умовах абразивного зношування, шляхом нанесення зносостійких покриттів на його робочі поверхні.

### **Методи і об'єкти досліджень**

Дослідний матеріал для наплавлення електродугових покриттів виготовлявся у вигляді однозамкових порошкових електродів (ПЕ). Перевагами даної конструкції матеріалу для наплавлення є простота технології виготовлення без використання процесу волочіння, а також можливість отримувати високий коефіцієнт заповнення електродів легуючими компонентами (до 60...70%) [1], що дозволяє ефективно використовувати як шихтовий наповнювач компоненти з низькою насипною масою та здійснювати більш високе легування наплавленого шару.

Виготовлення ПЕ для реалізації процесу електродугового наплавлення проводили на лабораторному прокатному стані. Як оболонка для виготовлення ПЕ використовувалась холоднокатана сталевая стрічка 08кп за ГОСТ 3559-75 розміром  $0,5 \times 20$  мм (виробник ВАТ «Запорізький металургійний комбінат «Запоріжсталь»).

Вибір компонентів шихтового наповнювача проводився на основі аналізу вартості та доступності металевих компонентів карбідних фаз, що, зазвичай, входять до складу матеріалів для наплавлення. Проведений аналіз показав, що для створення покриттів найбільш раціонально використовувати титан, оскільки запаси титанової руди в Україні становлять понад 5,9 млн. тонн [2], що обумовлює економічну доцільність його застосування. З метою отримання високої ударостійкості у шихту додатково вводили феросилікомарганець.

Шихтовий наповнювач готувався у вигляді механічної суміші порошкових компонентів в інерційному барабанному змішувачі. Час змішування становив 60 хв за частоти обертання  $40 \text{ хв}^{-1}$ .

Перед зважуванням і змішуванням компоненти просували у сушильній шафі типу СНОЛ протягом 90 хв за температури  $120^\circ\text{C}$ . Основними компонентами шихтового наповнювача були феросилікомарганець ФМ17 (ГОСТ 4756 - 91), порошок карбіду титану ТУ 6-09-492-75.

Наплавлення дослідних матеріалів у процесі виготовлення зразків та шліфів проводили в ручному режимі з використанням зварювального випрямляча марки ВДУ-506. Режими наплавлення: вольт-амперна характеристика дуги – падаюча, сила струму – 160...180 А, напруга дуги – 30...32 В, полярність – зворотна. Наплавлення здійснювалось на сталеву основу, виготовлену зі сталі 45 (ГОСТ 1050-88).

Визначення стійкості при аероабразивній ерозії проводилось на відцентровому прискорювачі Клейса у середовищі кварцового піску.

Для визначення відносної абразивної зносостійкості дослідних наплавлених матеріалів використовували серійні зносостійкі наплавлені матеріали, що призначені для застосування в умовах абразивного зношування, а саме електроди марок Т-590, ESAB ОК 84.8, Lastek 2400.

З метою дослідження мікроструктури наплавлених покриттів виготовляли поперечні шліфи шляхом механічного шліфування та наступного полірування за стандартною методикою [3].

Структуру покриттів досліджували методами РЕМ і МРСА за допомогою скануючого електронного мікроскопа ZEISS EVO 40XVP з системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy, а також енергодисперсійного рентгенівського спектрометра INCA ENERGY 350 з літєвим детектором, що забезпечує роздільну здатність 133 еВ, чутливість визначення домішки 0,01 %, локальність аналізу – від 1 мкм.

Аналіз знімків мікроструктур наплавлених шарів, отриманих за допомогою електронного мікроскопу ZEISS EVO 40XVP, проводився з використанням спеціалізованого програмного пакету для обробки та аналізу зображень «Image-Pro Plus» [4].

Твердість за методом Роквелла вимірювали на твердомірі ТК-2 (ГОСТ 3882-74) втискуванням алмазного конуса при навантаженні  $\sim 1,5 \text{ кН}$  (шкала С). Перед вимірюванням твердості проводилось деформування поверхневого наплавленого шару із використанням твердоміру ТШ-2. При цьому як індентор використовувалась твердосплавна кулька діаметром 10 мм, виготовлена за ГОСТ 3722-81. Навантаження при втисканні становило 3000 кг. Твердість вимірювалась як у лунці так і поза нею. За різницею твердості розраховували ступінь наклепу.

Для визначення відносної абразивної зносостійкості проводились шляхом тертя по закріпленому абразиву. Як контртіло (абразив) використовувався абразивний круг діаметром 300 мм та товщиною 40 мм. Швидкість ковзання

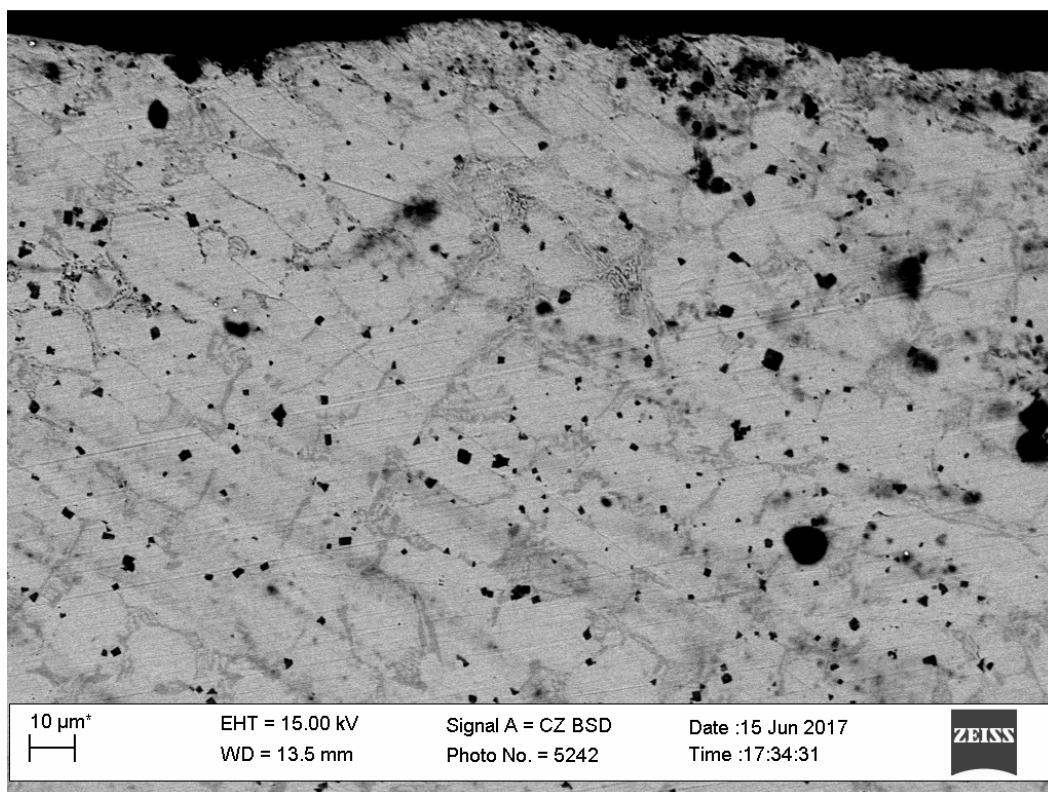


Рисунок 1 – Мікроструктура наплавленого покриття системи Fe-Ti-Mn-C

становила 0,21 м/с, шлях тертя становив 33 м. Випробовування проводилось на зразках циліндричної форми діаметром 10 мм. Еталоном при дослідженнях була сталь марки 110Г13Л, наплавлена на зразок циліндричної форми газополуменевим методом. Оцінка зносостійкості проводилась за втратою маси шляхом зважування взірців на аналітичних вагах із точністю ~ 1 мг.

**Результати та їх обговорення.** Мікроструктура наплавленого покриття (рис. 1) складається із зерен матричної фази, які мають витягнуту форму та розташовані під кутом до наплавленої поверхні у прошарках, між якими виявлено структуру евтектичного типу та дисперсних включень, які рівномірно розташовані в об'ємі наплавленого металу. Форма дисперсних включень є ограненою та у багатьох випадках у площині шліфа має форму куба. Розміри частинок знаходяться у діапазоні 1-3 мкм, а їх об'ємний вміст становить ~ 10 %.

Результати рентгеноспектрального мікроаналізу показали, що темна фаза ограненої форми характеризується одночасно високими піками титану та вуглецю. Враховуючи кубічну форму зерен, можна зробити висновок, що вказана фаза представляє собою карбід титану. Темна фаза без виразної огранки містить піки Fe, Mn, C та O і, ймовірно, представляє собою

пори. Світла та сіра фази містять в основному піки Fe та Mn, що відповідає складу марганцевому аустеніту. Такі результати також представлені у дослідженнях, наведених у роботах [5-8].

Твердість покриття, виміряна на твердомірі ПМТЗ у зоні, що прилягає до основи, становить 520 Н<sub>200</sub>. При цьому твердість основи становить 217 Н<sub>200</sub>.

Для вимірювання твердості за Роквелом поверхневого шару без деформації та після пластичної деформації на твердомірі Брінеля було вибрано 4 зразки із вмістом TiC 0 %, 5 %, 10 % та 15 % (мас.). Результати вимірювання мікротвердості (рис. 2) показують, що підвищення кількості карбідної фази веде до зростання твердості у концентраційному діапазоні до 10 % об. Подальше підвищення вмісту карбиду титану призводить до зниження твердості. Це зумовлено тим, що підвищення вмісту карбідної фази викликає технологічні труднощі при виготовленні електродів через високу дисперсність вихідної шихти. Крім цього, у процесі наплавлення суттєво знижується рідкотекучість металу, що наплавляється і, як наслідок, з'являються пори у наплавленому шарі. Пластична деформація у всіх розглянутих випадках сприяє підвищенню твердості через забезпечення у наплавленому шарі утворення марганцевого аустеніту. При цьому найвищі показники

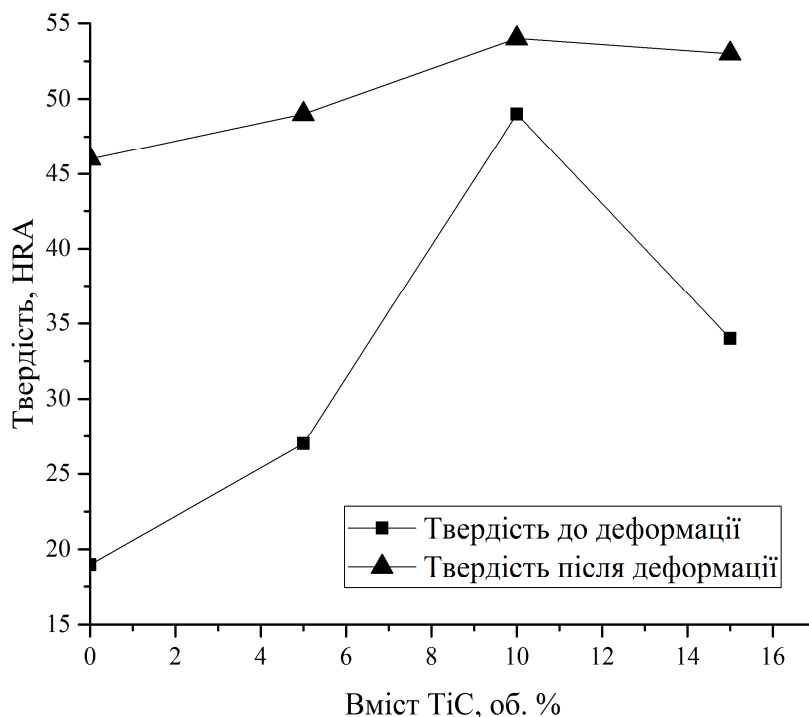


Рисунок 2 – Результати вимірювання мікротвердості наплавлених шарів залежно від концентрації карбіду титану

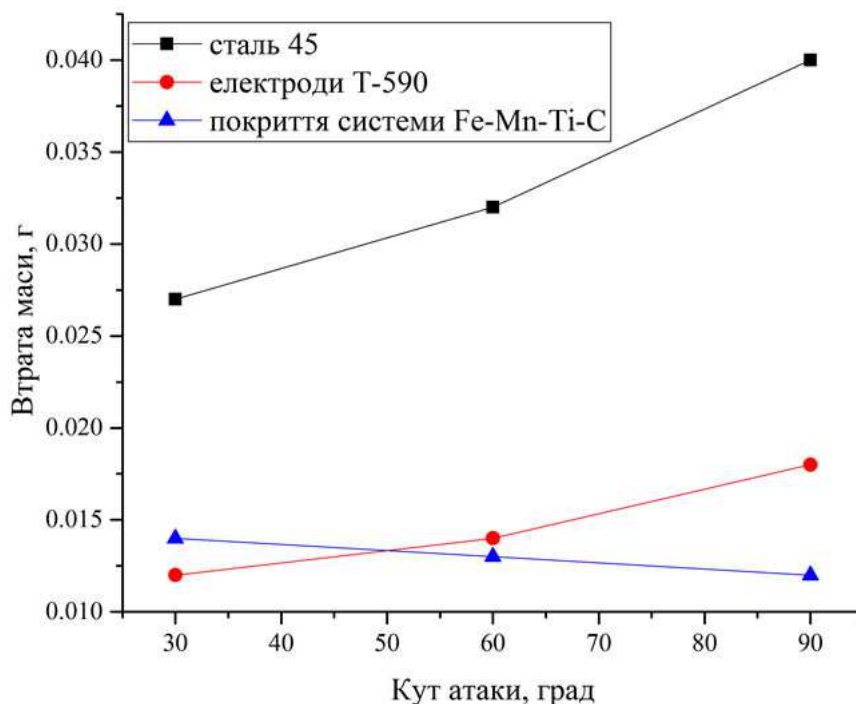
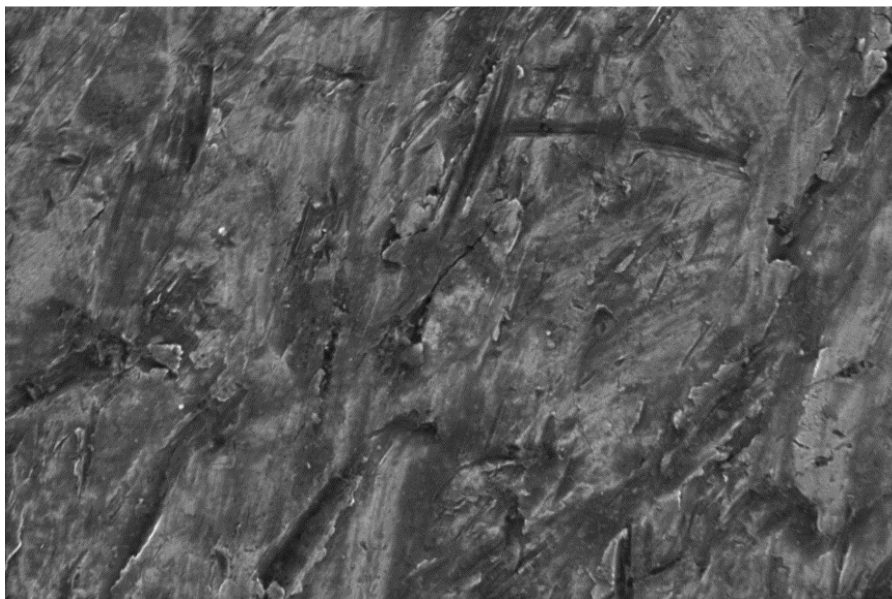


Рисунок 3 – Залежність втрати маси від кута атаки абразиву при випробуваннях на газоабразивне зношування

досягаються при вмісті TiC – 10%, що відповідає елементному складу: Fe69,23 - Ti 5,39 - Mn18,77 - C2,28.

Результати дослідження зносостійкості покриття системи Fe-Ti-Mn-C та покриття із електродів Т-590 при газоабразивному зношуванні (рис. 3) показують, що мінімальна зносостійкість покриття спостерігається для кута атаки

$\alpha = 30^\circ$ , при якому зношуваність розробленого покриття найбільша. Низька зносостійкість покриттів при малих кутах атаки абразивними частинками (характерна для в'язких матеріалів) може бути пояснена відсутністю при малих кутах атаки наклепу – основного чинника, що викликає зміцнення поверхні, яка містить велику кількість марганцевого аустеніту.



**Рисунок 4 – Рельєф поверхні покриття після випробувань на газоабразивне зношування (кут атаки 90°). Масштаб 500:1**

При прямому попаданні абразивних частинок (кут атаки 90°) зносостійкість покриттів системи Fe-Ti-Mn-C дещо збільшується, що, викликано розвитком процесів деформаційного зміцнення у поверхневому шарі. Покриття на основі електродів Т-590 за умов кута атаки рівного 90° проявляють низьку зносостійкість. Це викликано тим, що карбідні фази викришуються внаслідок крихкого руйнування (рис. 3). Сліди крихкого руйнування поверхонь зразків після випробувань за результатами мікроскопічних досліджень (рис. 4) не були виявлені.

Отже, роль здатності сталі до деформаційного зміцнення у вигляді матричної фази покриттів в умовах газоабразивного зношування значною мірою підвищується при збільшенні інтенсивності динамічного впливу.

Для порівняльного аналізу зносостійкості в умовах тертя по закріпленому абразиву як еталон при випробуваннях використовувалась сталь 110Г13Л. Розроблені покриття порівнювались із матеріалами для наплавлення, які застосовуються для умов роботи, що супроводжуються інтенсивним ударно-абразивним зношуванням. Це, зокрема, електроди: Т-590 ("Плазматек", Україна), ОК 84.80 (фірма ESAB, Велика Британія), ЦС-1 (сормайт, ГОСТ 21449—75). [9,10]

Результати порівняльного аналізу зносостійкості (рис. 5) показують, що покриття системи Fe-Ti-Mn-C із вираженою гетерофазовою будовою характеризуються співмірною зносостійкістю порівняно із розповсюдженими матеріалами для наплавлення, призначеними для роботи в умовах тертя по закріпленому абразиву.

Як видно із рисунку 5, відносна абразивна зносостійкість розроблених покриттів із вмістом карбідної фази ~ 10 % за об'ємом порівняно із сталлю 110Г13Л є вищою приблизно у 2,5 рази. Це створює передумови для її застосування в умовах, де абразивне зношування супроводжується динамічними навантаженнями.

### Висновки

На основі аналізу складу покриттів у системі Fe-Ti-Mn-C встановлено, що вказана система є перспективною для розроблення порошкових електродних матеріалів, оскільки при напавленні у ній зберігається двофазова структура. Встановлено, що у системі Fe-Ti-Mn-C оптимальна концентрація елементів, яка забезпечує існування структури аустеніт + карбід титану, наступна: Fe – 69,23 %; Ti – 5,39 %; Mn – 18,77 %; C – 2,28 %. Електронномікроскопічні дослідження шару, отриманого із порошкового дроту вказаного складу, показують, що він складається із марганцевого аустеніту, придатного до наклепу, та дисперсних (1-3 мкм) включень карбиду титану об'ємом 10 %. Показано, що при поверхневій пластичній деформації твердість суттєво (на 10-20 HRC) зростає, що зумовлено одночасно дисперсійним та деформаційним зміцненням.

Випробування розроблених покриттів за умов аероабразивного зношування показують, що їх зносостійкість при прямих кутах атаки суттєво перевищує зносостійкість традиційних матеріалів для зносостійкого наплавлення, а при терті по закріпленому абразиву зносостій-

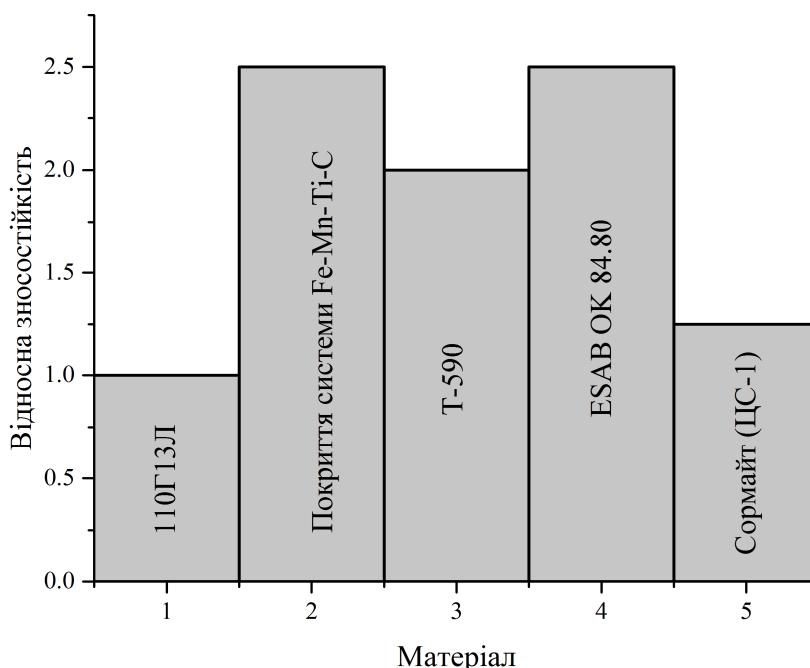


Рисунок 5 – Відносна зносостійкість покриттів системи Fe-Ti-Mn-C при терті по закріпленому абразиву

кість покриттів знаходиться на рівні кращих світових аналогів.

У подальших дослідженнях планується використання як шихтового наповнювача сполук титану у комбінації із іншими карбідами перехідних металів та феросплавами, які містять елементи, що використовуються для легування сталі.

### Література

1 Жудра А. П. Наплавочные порошковые ленты (Обзор) / А. П. Жудра // Автоматическая сварка. – 2012. – № 1. – С. 39–44.

2 Развитие технологий добычи, обогащения и переработки титанового сырья в мире и Украине / Т. А. Олейник, Т. П. Гурьянова, Г. А. Колобов та ін. // Наукові праці Запорізької державної академії. – 2010. – № 22. – С. 23-29.

3 Вашуль Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов: монографія / Х. Вашуль. – Москва: Металлургия, 1988. – 320 с.

4 ImageJ: Image Processing and Analysis in Java. – Режим доступу: <http://rsbweb.nih.gov/ij>

5 Присяжнюк П. М. Триботехнічні властивості карбідосталі NbC-сталь Гадфільда / П. М. Присяжнюк, М. Й. Бурда // Проблеми трибології. – 2014. – № 1. – С. 88-94.

6 Криль Я.А. Структуроутворення та властивості керметів NbC - сталь Гадфільда / Я.А. Криль, П.М. Присяжнюк // Сверхтвердые материалы. – 2013. – № 5. – С. 49-55.

7 Присяжнюк П. М. Розрахунок фазової рівноваги у системі NbC – марганцева сталь для розробки карбідосталей / П. М. Присяжнюк // Фізика і хімія твердого тіла. – 2014. – № 3. – С. 575-578.

8 Присяжнюк П.М. Формування структури керметів  $Cr_3C_2$ -МНМц 60-20-20 / П.М. Присяжнюк, Т. Шіхаб, В.Г. Панчук // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2016. – №52(2). – С. 43-47.

9 Lutsak D. Development of a Method and an Apparatus for Tribotechnical Tests of Materials Under Loose Abrasive Friction / D. Lutsak, P. Pryszyzhnyuk, M. Burda, V. Aulin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – No 7(83). – 2016. – С. 19-26.

10 Lutsak D. L. Formation of Structure and Properties of Composite Coatings  $TiB_2$ -TiC-Steel Obtained by Overlapping of Electric-Arc Surfacing and Self-Propagating High-Temperature Synthesis // D. L. Lutsak, P. M. Pryszyzhnyuk, M. O. Karpash, V. M. Pylypiv, V. O. Kotsyubynsky // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2016. – Т. 38, №9. – С. 1265-1278.

Стаття надійшла до редакційної колегії 10.12.18

Рекомендована до друку професором **Копеєм Б.В.** (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) канд. техн. наук **Пилипченком О.В.** (НВФ «Епсілон», м. Івано-Франківськ)