

УДК 621.791.927.5

В. Д. КУЗНЕЦОВ<sup>1</sup>, Д. В. СТЕПАНОВ<sup>1</sup>, В. М. ПАЩЕНКО<sup>1</sup>, В. В. ПЕРЕМІТЬКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «КПІ», Україна

<sup>2</sup>Дніпродзержинський державний технічний університет, Україна

## ВПЛИВ НАНООКСИДУ КРЕМНІЮ ТА ВУГЛЕВМІСНОГО МАТЕРІАЛУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ

*Наведено результати випробувань на знос наплавленого металу, модифікованого наноксидами кремнію і вуглецевим волокном при використанні наплавочних матеріалів, що рекомендовані для умов сухого тертя металу по металу. Показано, що введення в зварювальну ванну наноксидів і вуглецевісних волокон призводить до підвищення зносостійкості наплавленого металу.*

**Ключові слова:** дугове наплавлення, зносостійкість, наноксиди, вуглеволокно, неметалеві включення, структура.

**Вступ.** Значна кількість деталей машинобудівного комплексу працює в умовах тертя металу по металу і виготовляється з вуглецевих і низьколегованих сталей. При відновленні таких деталей застосовують стандартні зварювальні матеріали, наприклад, електродний дріт Св-08А, 18ХГСА, 30ХГСА, дріт конструкційних сталей 40, 45, 65Г.

З підвищенням вмісту вуглецю виникає загроза утворення холодних тріщин і їх уникнення потребує попереднього чи супутнього підігріву при наплавленні. Як правило, підігрів є необхідною технологічною операцією, особливо, при наплавленні відкритою дугою в вуглекислому газі. У цьому випадку, наприклад, при наплавленні на сталь 45 дротом 30ХГСА утворюється сорбітна структура з твердістю металу 300 НВ.

При наплавленні під флюсом на сталь 45 дротом 30ХГСА завдяки більш уповільненому охолодженню холодні тріщини не утворюються і операція попереднього чи супутнього підігріву виключається, що знижує трудомісткість виробництва. Але у цьому випадку суттєво знижується твердість наплавленого металу і частково зносостійкість.

Тому підвищення ефективності застосування рекомендованих стандартних наплавних матеріалів потребує пошуку нових підходів щодо керування структурою і властивостями наплавленого металу без зміни системи легування.

В останні роки в літературі відмічається позитивна роль неметалевих включень, у тому числі, нано розмірного діапазону на структуру і зносостійкість наплавленого металу. Так, у роботі [1] вказується на підвищення зносостійкості плазмо-порошкового наплавлення з додаванням до порошку нано оксидів, у роботі [2] – нано карбідів в покриття електродів при наплавленні покритими електродами. У роботі [3] досліджено вплив нано оксидів на зносостійкість структур ледобуритного і мартенситного типу. Автори роботи [4] вказують також на доцільність введення до зварювальної ванни вуглецевісних матеріалів. Незважаючи на обмеженість інформації цього напрямку наявний досвід вказує на перспективність їх застосування в процесах наплавлення.

**Мета роботи** – експериментальне дослідження зносостійкості наплавленого металу при введенні до зварювальної ванни наноксиду кремнію та вуглецевісного матеріалу.

**Матеріали та методики досліджень.** Наплавлення проводили автоматом АД-231 на сталь 45 з використанням рекомендованого для умов тертя металу по металу дроту Нп-30ХГСА діаметром 2 мм під шаром флюсу АН-60 на режимах: струм  $I = 250$  А, напруга дуги  $U = 30$  В, швидкість наплавлення  $V = 16$  м/год,  $h = 20$  мм.

В дослідях застосовували порошок аеросилу ( $\text{SiO}_2$ ) фракцією 5–40 нм, який на відміну від інших nano порошків виробляється промислово і відрізняється низькою вартістю. Вуглецеве волокно являє собою матеріал з тонких ниток діаметром от 5 до 15 мкм, утворених переважно атомами вуглецю, які розташовані у вигляді мікроскопічних кристалів паралельно один одному.

Нано порошок аеросилу вводили до зварювальної ванни як суміш із залізним порошком фракцією 50 мкм, і безпосередньо без суміші. У першому випадку задане об'ємне співвідношення суміші після обробки у планетарному млині для запобігання розсіювання попередньо закріплювали ґрунтовкою і наносили тонким шаром на ширину валику по довжині наплавлення. За такою схемою здійснювали введення до зварювальної ванни тільки нано порошку діоксиду кремнію з перерахунком масової частки до об'єму зварювальної ванни і вуглецевого волокну у вигляді стрічки відповідно до ширині і довжині валику.

Для умов тертя металу по металу випробування на зносостійкість виконували на машині тертя типу СМЦ-2 за схемою вал – колодка на зразках довжиною 20 мм і шириною 10 мм. В якості контртіла використовували диск 50мм зі сталі У8 твердістю НВ 400–450. Умови випробувань: тиск на зразок –  $P = 0,1$  МПа; швидкість тертя –  $V = 0,8$  м / с; температура випробувань –  $T = 20$  °С; тривалість випробувань – 2,5 години з вимірами через кожні 30 хв.

Зразки зважували до і після випробувань на точних лабораторних вагах з похибкою 0,001 гр. Масовий знос визначали як різницю значень маси зразка до і після випробувань.

Дослідження особливостей розподілення неметалевих включень виконували на нетравлених шліфах на оптичному мікроскопі «Neophot-30» з комп'ютерною обробкою зображень для отримання інформації об їх об'ємному вмісті.

Хімічний склад включень вивчали по результатах сканування на електронному скануючому мікроскопі JSM35CF з приставкою для локального рентгено-спектрального аналізу INCA Energy 350.

**Результати проведених досліджень.** Випробування наплавленого металу показали, що зносостійкість підвищується при введенні у зварювальну ванну як нано порошку аеросилу, так і вуглевмісного матеріалу (рис. 1). Особливо помітне підвищення зносостійкості у випадках введення 6% вуглевмісного матеріалу і аеросилу як у суміші, так і безпосередньо без суміші.

Втрати в масі після 150 хв. випробування для вихідного наплавленого металу складають – 0,11 г. (рис. 1, крива 1), для металу з 6% вуглевмісного матеріалу – 0.038г. (рис. 1, крива 3), що вказує на підвищення зносостійкості маже у 3 рази.

Для металу з 15%  $\text{SiO}_2$ – 0.05 г. (рис. 1, крива 4) і для металу з сумішшю 9% ( $\text{Fe}+\text{SiO}_2$ )– 0.033 г. (рис. 1, крива 5), що свідчить про збільшення зносостійкості у 2,4 та у 3,3 рази відповідно.

Вимірювання мікротвердості показали, що при середньому значенні металу вихідного валика  $HV 195$ , мікротвердість металу у решта випадках вища (15%  $\text{SiO}_2$ –  $HV 208$ , 6% ( $\text{Fe}+\text{SiO}_2$ ) –  $HV 259$ , 3% вуглецевого волокну–  $HV 462$ , 6% вуглецевого волокну–  $HV 522$ ).

У даному випадку спостерігається кореляція між твердістю і зносостійкістю.

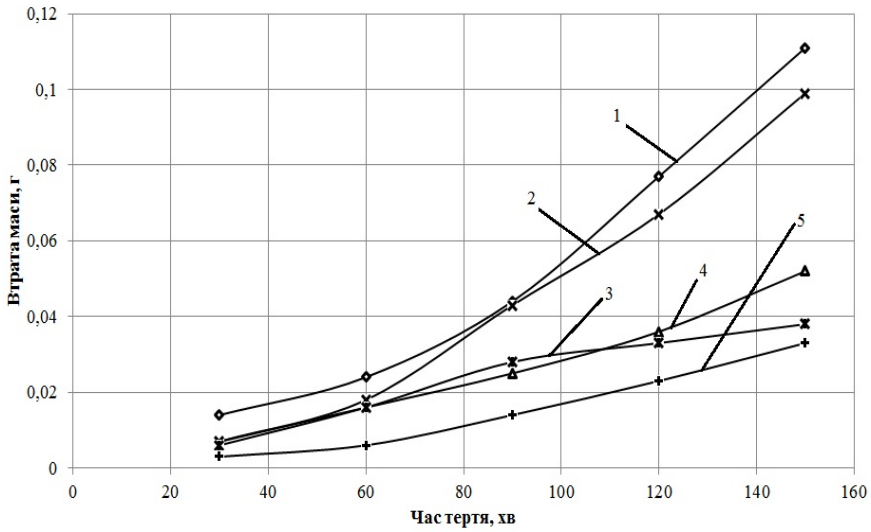


Рис. 1. Зносостійкість наплавленого металу: 1 – вихідний валик; 2 – 3% вуглецевого волокну; 3 – 6% вуглецевого волокну; 4 – з нано порошком 15%  $\text{SiO}_2$ ; 5 – з сумішшю порошоків 9%  $\text{Fe}+\text{SiO}_2$

Аналіз показав, що структура металу вихідного валіку являє собою ферито-цементитну суміш переважно внутризереного фериту незначної дисперсності (рис. 2, а).

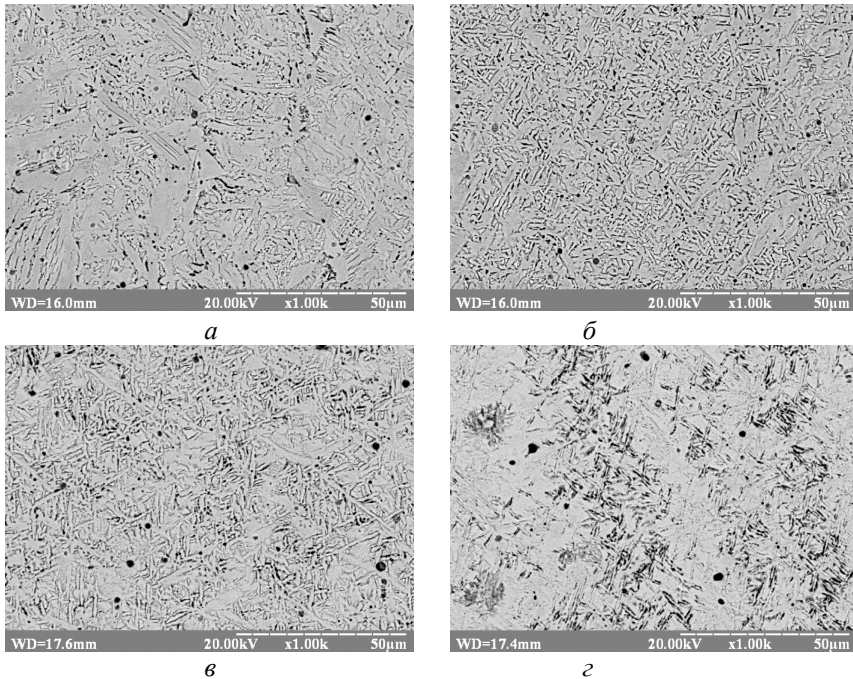


Рис. 2. Структури наплавленого металу: а – вихідний валик; б – з нано порошком 15%  $\text{SiO}_2$ ; в – з сумішшю порошоків 9% ( $\text{Fe}+\text{SiO}_2$ ); г – з 6% вуглецевого волокну.

При наплавленні з нано оксидом 15%  $\text{SiO}_2$  суттєво збільшується дисперсність ферито-цементитної суміші (рис. 2, б), що, ймовірно, пояснює підвищення зносостійкості.

У випадку наплавлення діоксида кремнію із залізним порошком як частинки носія діоксиду кремнію 9% ( $\text{Fe}+\text{SiO}_2$ ) структура являє собою суміш полігонального і голчатого фериту (рис. 2, в). Відомо, що голчатий ферит поєднує високі міцнісні і в'язкі властивості і, таким чином, сприяє підвищенню зносостійкості.

Введення у розплави ванни вуглевісного матеріалу формує мартенситну структуру з карбідними виділеннями, що і приводить до підвищеної зносостійкості (рис. 2, з).

Для оцінки ролі неметалевих включень на формування структури металу валіків досліджували їх хімічний склад, розміри і щільність виділень в металевій матриці.

Для ідентифікації включень додатково проводили зйомку в зворотних електронах, що дозволяло ідентифікувати їх як включення, а не як можливі пори.

Було встановлено, що включення мають, як правило, сферичну форму, але зустрічаються і включення неправильної форми. При цьому, виділення включень спостерігається як в тілі зерна, так і на границях ферритної фази, що може свідчити про можливу роль включення як зародка фериту.

Комп'ютерна обробка результатів розподілу неметалевих включень за розміром дозволила виділити із загального масиву даних три основні групи за цими ознаками: включення розмірами до 0,3 мкм, від 0,3 до 0,8 мкм і більше 0,8 мкм.

За результатами аналізу розподілення кількості включень встановлено, що у вихідному стані їх об'ємна частка становить 0,3 % і відповідає, в основному, розмірному діапазону 0,07 – 0,85 мкм, з яких від 6 до 13% знаходяться у діапазоні 0,13 – 0,61 мкм.

У металі валіка з сумішшю 9 % ( $\text{Fe}+\text{SiO}_2$ ) об'ємна частка включень становить 0,32 % , але відповідає, в основному, розмірному діапазону 0,07 – 0,73 мкм, з яких від 6 до 16 % знаходяться у діапазоні 0,07 – 0,55 мкм.

Об'ємна частка включень суттєво збільшується при застосуванні тільки нанопорошку діоксида кремнію і становить у металі валіку 0,56%, з яких від 4 до 10 % приходить на розмірний діапазон 0,07 – 0,61 мкм.

Наплавлені валіки з вуглевісним матеріалом характеризуються об'ємною часткою включень 0,28 % і 0,31 % – 3 і 6 % вуглецевого волокна відповідно і основна їх частка від 4 до 8 % знаходиться у розмірному діапазоні 0,07 – 0,75 мкм.

Порівняльний аналіз даних вказує на збільшення об'ємної частки включень при наявності діоксида кремнію і на значно менший їх розмірний діапазон порівняно з металом вихідного валіку.

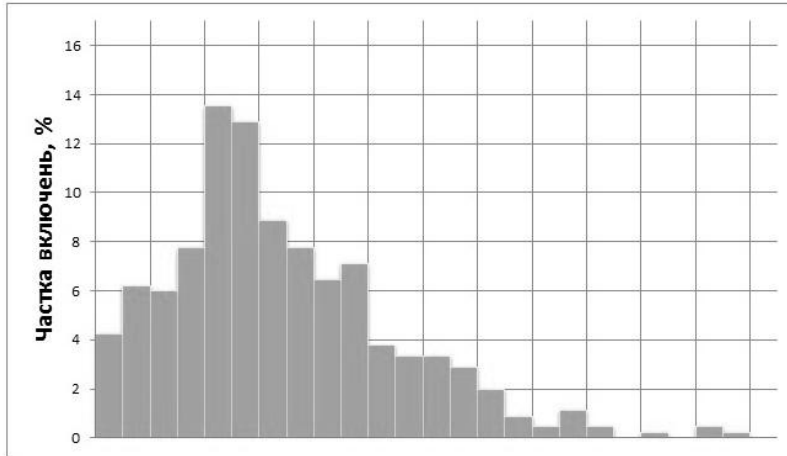
Встановлені закономірності підтверджуються результатами обробки розмірів включень тільки сферичної форми за показником діаметру рівнозначного кола.

Для прикладу, на рис 3 наведено гістограми за об'ємним вмістом і розподіленням таких включень у металі вихідного валіку і при наявності діоксида кремнію.

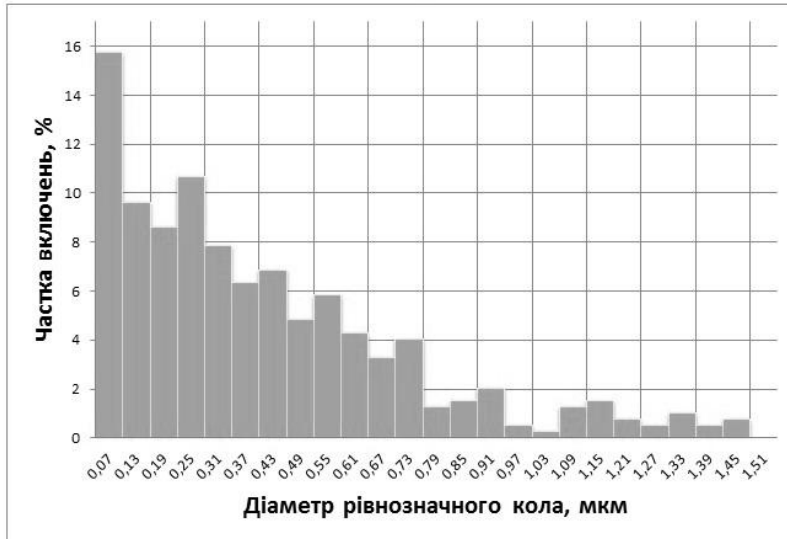
У вихідному стані основна частина (від 4 до 8 %) сферичних включень приходить на розмірний діапазон 0,07– 0,25 мкм. і 0,43 – 0,67 мкм. і тільки до 13 % на діапазон 0,31 – 0,37 мкм. (рис. 3, а).

У випадку наплавлення з діоксидом кремнію, навпаки, основна частка включень від 8 до 16% відповідає значно меншому 0,03 – 0,31 мкм. розмірному діапазону (рис. 3, б), що узгоджується з даними роботи [5], де зроблено висновок про саме такий розмірний діапазон, який сприяє утворенню голчатого фериту.

Результати аналізу хімічного складу включень показали, що у вихідному наплавленому металі включення в основному складаються із сульфіду марганцю, про що свідчать високий вміст марганцю і сірки при скануванні включень і відповідає відомим даним о складі включень у такій системі легування наплавленого металу (рис. 4).



а



б

Рис. 3. Гістограма розподілення неметалевих вклучень у наплавленому металі за показником діаметра рівноцінного кола: *a* – у вихідному стані; *б* – із сумішшю 9% (Fe+SiO<sub>2</sub>)

Підтвердженням засвоєння зварювальною ванною оксиду кремнію і його наявності у наплавленому металі є підвищений вміст кисню і кремнію у вклученнях при їх скануванні (рис. 5).

При введенні вуглевісного матеріалу при скануванні на вклученнях фіксується підвищений вміст вуглецю залізу і хрому, що підтверджує наявність карбідних виділень такого типу у структурі металу. Окрім того, формування мартенситної структури свідчить про перехід вуглецю у твердий розчин як легуючого елемента.

Таким чином, комплексний аналіз вклучень вказує на істотну відмінність їх розмірів і щільності розподілу в металевій матриці при наявності нано оксиду і вуглецю, що впливає на структуру металу валиків і зносостійкість.

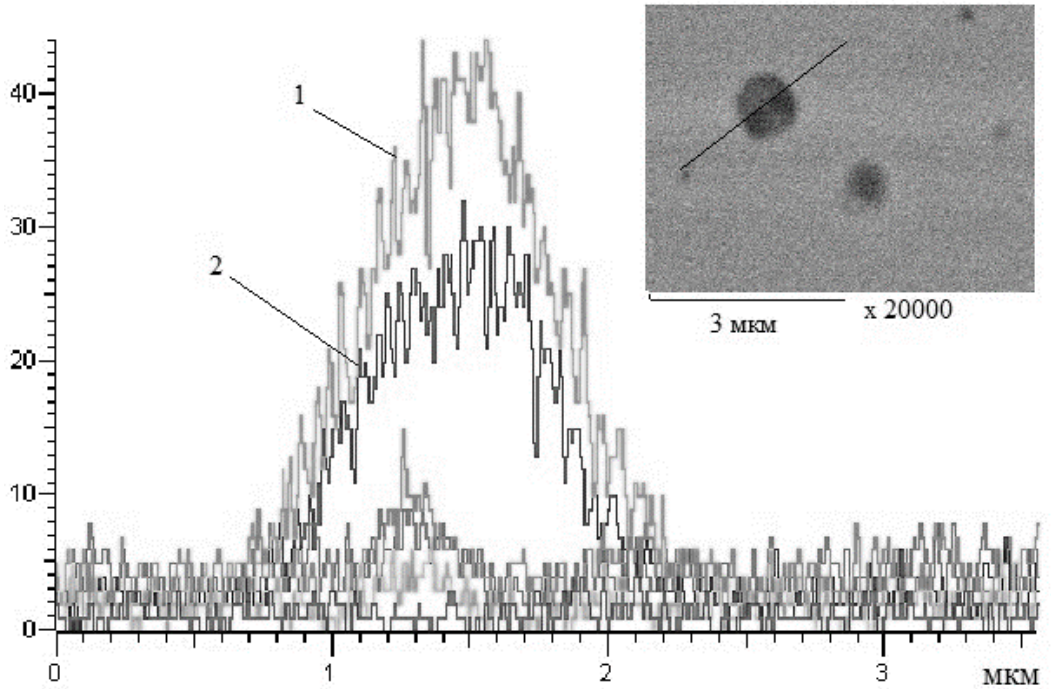


Рис. 4. Спектр елементів при скануванні включень металу вихідного валіка: 1 – сірка; 2 – марганець; також присутні кисень, алюміній, вуглець, кремній.

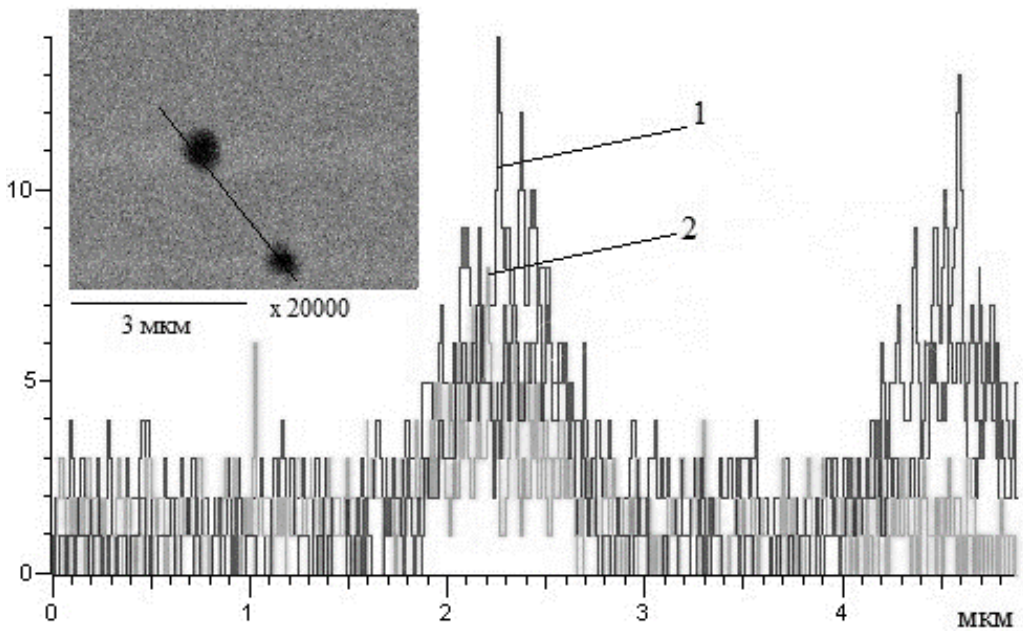


Рис. 5. Спектр елементів при скануванні включень металу валіка із сумішшю 9% (Fe+SiO<sub>2</sub>): 1 – кисень; 2 – кремній, також присутній марганець.

**Висновки:**

1. Ефективність використання стандартних наплавних матеріалів для відновлення поверхонь, що працюють в умовах тертя металу по металу може бути суттєво підвищення застосуванням нано порошку діоксиду кремнію і вуглевмісного матеріалу. Зносостійкість наплавленого валику збільшується в 3,4 і 2,7 рази відповідно.
2. Введення діоксиду кремнію сприяє формуванню голчатого фериту, як структурної складової підвищеної міцності і в'язкості, що позитивно впливає на зносостійкість. Введення вуглевмісного матеріалу супроводжується зміною вихідної ферито-цементитної суміші на мартенсит і відповідно підвищенням зносостійкості.
3. Встановлено, що введення нано порошку діоксиду кремнію і вуглевмісного матеріалу приводить до утворення неметалевих включень переважно оксидного і карбідного типу відповідно

**Список літератури**

1. Князьков К.В. Повышение свойств плазменно-порошковых покрытий модифицированием наноразмерными частицами / К.В. Князьков, М.В. Радченко, А.Н. Смирнов и др. // Ползуновский вестник. –1/1-2012, с.127–130.
2. Г.Н. Соколов, И.В. Лысак, А.С. Трошков и др., Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама // Физика и химия обработки материалов. – 2009.–№5. С.18–25.
3. Кузнецов В.Д. Износостойкая наплавка с вводом в сварочную ванну нанопорошков / В.Д. Кузнецов, Д.В. Степанов // Автоматическая сварка. –2015 №5–6. –С. 52–56.
4. Савуляк В.І., Наплавлення високовуглецевих покриттів з використанням вуглецевих волокон / Савуляк В.І С.А. Заболотний, В.Й. Шенфельд // Проблеми трибології. – 2010.–№1. –С. 66–70.
5. Effect of Inclusion Size on the Nucleation of Acicular Ferrite in Welds / Т. К. Lee, Н. J. Kim, В. Y. Kang and S. K. Hwang // ISIJ Int., 40 (2000), P.1260–1268.

Стаття надійшла до редакції 29.09.2015

*V. D. KUZNETSOV, D. V. STEPANOV, V. M. PASHCHENKO, V. V. PEREMITJKO*

**EFFECT OF SILICON NANO OXIDES AND CARBONACEOUS MATERIAL ON THE WEAR RESISTANCE OF DEPOSITED METAL**

Results of wear resistance testing of weld-surfacing metal with silica nano oxides and carbon fiber using the surfacing materials recommended for conditions of dry friction of metal on metal are presented. It is shown that providing into the weld pool nano oxides and carbon fibers increases the wear resistance of the deposited metal. Silica dioxide contributes to the formation of acicular ferrite as the structural component of high strength and toughness, which positively affects on wear resistance. Carbonaceous material is accompanied by a change in the original ferrite–cementite mixture on martensitic structure and therefore increases wear resistance. Providing of nano silicon dioxide powder and carbonaceous material results to the formation of nonmetallic inclusions mainly oxide and carbide types in accordance.

**Keywords:** arc welding, wear resistance, nano-oxides, carbon fiber, non-metallic inclusions, structure.

**Кузнецов Валерій Дмитрович** – докт. техн. наук, професор кафедри інженерії поверхні, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ-56, Україна, 03056, тел. +38 044 406 82 42 E-mail: [v.kuznetsov@kpi.ua](mailto:v.kuznetsov@kpi.ua).

**Степанов Денис Володимирович** – асистент кафедри інженерії поверхні, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ-56, Україна, 03056, тел. +38 044 454 98 13 E-mail: schweiser1@gmail.com.

**Пашенко Валерій Миколайович** – канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії поверхні, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ-56, Україна, 03056, +38 044 454 99 14 E-mail: vn.paschenko@ukr.net.

**Перемітько Валерій Володимирович** – докт. техн. наук, доцент кафедри технології та устаткування зварювання, декан металургійного факультету, Дніпродзержинський державний технічний університет, вул. Дніпробудівська, 2, м. Дніпродзержинськ, Україна, 51918, тел. +38 0569 55 18 91, E-mail: welding@dstu.dp.ua.