

## PHYSICS OF STRENGTH AND PLASTICITY

PACS numbers: 06.60.Vz, 62.20.Qp, 62.23.Pq, 81.20.Vj, 81.40.Pq, 81.65.-b

### **Вплив способу введення нанопорошка діоксиду кремнію у зварювальну ванну на зносостійкість та структуру низьколегованого натопленого металу**

В. Д. Кузнєцов, Д. В. Степанов, В. В. Перемітько\*,  
О. Л. Косинська\*, А. І. Панфілов\*, І. В. Коломоєць\*

*Національний технічний університет України*  
*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,*  
*просп. Перемоги, 37,*  
*03056 Київ, Україна*  
*\*Дніпровський державний технічний університет,*  
*вул. Дніпробудівська, 2,*  
*51918 Кам'янське, Україна*

Вивчено вплив способу введення під час дугового нагрівання нанопорошка  $\text{SiO}_2$  у зварювальну ванну на зносостійкість та структуру низьколегованого нагрітого металу. Діоксид кремнію фіксували попереднім розбризкуванням на поверхню спиртового розчину, нанесенням суміші нанопорошка з флюсами або олівцем з парафіну та  $\text{SiO}_2$ . Нагрівання металу проводили на зразки зі сталі 09Г2С дротами Нп-30ХГСА під флюсом АН-60 та Св-08Г2С під флюсом АН-348А. Для коректності порівняння режим нагрівання зберігали незмінним. Випробування на зносостійкість проводили за умов тертя металу по металу за схемою вал–колодка. Величину зношування, одержану в результаті випробування, визначали зважуванням або вимірюванням зразків до та після процесу стирання. Виявлено залежність характеру змін у нагрітому металі від способу внесення додаткових матеріалів.

Corresponding author: Valeriy Viktorovich Peremitko  
E-mail: vperemitko@gmail.com

*National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute',*  
*37 Peremohy Ave., UA-03056 Kyiv, Ukraine*  
*\*Dniprovsk State Technical University,*  
*2 Dniprobudivska Str., UA-51918 Kamianske, Ukraine*

Citation: V. D. Kuznetsov, D. V. Stepanov, V. V. Peremitko, O. L. Kosynska, A. I. Panfilov, and I. V. Kolomoiets, Effect of Method of Silicon Dioxide Nanopowder Introduction into Weld Pool on Wear Resistance and Structure of Low-Alloyed Weld Metal, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 8: 1107–1118 (2020) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.42.08.1107](https://doi.org/10.15407/mfint.42.08.1107).

Найпомітніше підвищення твердості у випадку введення наноксиду у суміші з флюсом АН-60 за спреї-технологією та застосування дроту Нп-30ХГСА. Максимальну зносостійкість мають зразки, нагріті тим самим дротом при внесенні до зварювальної ванни нанопорошка, закріпленого парафіном. Ефективність схем введення залежить від системи легування електродного матеріалу: під час нагрівання дротом Св-08Г2С одночасного зростання твердості та зносостійкості не спостерігалось. Введення наноксиду кремнію у суміші з флюсом призводить до формування дрібнодисперсної структури ферито-карбідного складу. Фіксується комбінація фериту різної морфології: полігональний ферит на межах зерен, від якого росте відшарований ферит, та різнонаправлені пластини голчастого фериту. Від внесення нанопорошка діоксиду кремнію у суміші з парафіном збільшується кількість цементитних виділень. З'ясовано, що зростання твердості пропорційне подрібненню феритно-карбідної складової структури, а підвищення зносостійкості — кількості цементитних виділень.

**Ключові слова:** дуговий напі, внесення нанопорошка, варіювання схем, твердість, зносостійкість, структурно-фазовий склад нагрітого металу.

The effect of the  $\text{SiO}_2$  nanopowder's adding into the welding bath on the wear resistance and structure of low-alloyed weld metal is studied. Silicon dioxide is fixed by preliminary spraying onto the surface of the alcohol solution, by applying a mixture of nanopowder with fluxes or a paraffin pencil and  $\text{SiO}_2$ . Hardfacing is carried out on the templates of steel 09Г2С with wires Нп-30ХГСА under flux АН-60 and Св-08Г2С under flux АН-348А. For correct comparison surfacing regime is constant. Test of durability are carried out for friction conditions of metal by metal according to the scheme of shaft-pads. The amount of wear received as a result of test is determined by weighing or measuring of templates before friction process and after it. The dependence of changes nature in the weld metal on the adding method of additional materials is revealed. The most noticeable increasing of hardness is observed with adding of nano-oxide in a mixture with flux АН-60 with spray technology and using the wire Нп-30ХГСА. Templates welded with the same wire with adding of nanopowder fixed with paraffin to weld bath have maximum wear resistance. The efficiency of adding schemes depends on welded metal's alloying schemes: during hardfacing with wire increasing of hardness and wear resistance is not observed. Adding of silicon nanoxide in mixture with flux causes the formation of a fine structure with ferrite-carbide composition. The combination of ferrite with different morphologies is recorded: there is polygonal ferrite at the borders of grains which grows outwards ferrite and divergent plates of needle-shaped ferrite. The number of cementitious secretion increases because of adding the silicon dioxide nanopowder in a mixture with paraffin. Proportionality of hardness increasing to grinding of ferrite-carbide structural component and of wear-resistance increasing to number of cementitious secretions is found.

**Key words:** arc surfacing, deposited nanopowder, variations of schemes, hardness, wear resistance, structural-phase composition of the weld metal.

*(Отримано 16 липня 2019 р.; остаточн. варіант — 22 квітня 2020 р.)*

## 1. ВСТУП

Досвід використання матеріалів нанорозмірного (до 100 нм) діапазону відомий у порошковій металургії, литті тощо. Так, додавання згаданих матеріалів під час одержання заготовок методами порошкової металургії спричиняє зниження пористості металу, підвищення механічних властивостей [1]. Внесення нанопорошкових матеріалів під час зварювання та нагрівання також дає позитивний результат. Зокрема, внесення нанокарбідів титану у зварювальну ванну за допомогою порошкового дроту сприятливо вплинуло на формування структури та властивостей зварного шва низьколегированих високоміцних сталей [2–4]. Порошковий дріт безпосередньо підключали до зварювального ланцюга або закладали у розроблення кромки. Введення незначної (до 0,2% мас.) кількості нанорозмірних частинок карбідів вольфраму застосовували під час електродугового та електрожужільного нагрівання [5]. Подрібнення структурних складових нагрітого металу досягали шляхом подачі частинок як безпосередньо у зварювальну ванну, так і зі зварювальними матеріалами. Нанодисперсні карбіди, оминаючи високотемпературну (до 8000°C) реакційну зону, не повністю розчиненими переходять у нагрітий метал, що спричиняє його модифікування.

У роботі [6] зазначено, що наявність у зварювальній ванні достатньої кількості неметалевих включень, які зіставні за своїми розмірами із зародками металу, що кристалізується, сприяє формуванню дрібнозернистої первинної структури зварного шва і поліпшенню його механічних властивостей.

Таким чином, одержання дрібнозернистої структури шва відкриває нові можливості для застосування у процесі модифікування нанопорошків туготопких з'єднань, що мають особливі фізико-хімічні властивості. Унікальність останніх пов'язана з тим, що в частинках нанопорошка кількість атомів на поверхні сумірна з їх кількістю в об'ємі, у результаті чого різко зростає частка поверхневої енергії у загальному енергетичному балансі.

Нині наноструктуровані матеріали використовують в основному як високоміцні та зносостійкі. Внесення нанодисперсних частинок карбіду кремнію у чавуни призводить до зростання їхньої зносостійкості. При цьому міцність сірого чавуну збільшується на 20–30%, а твердість — на 10%. У зносостійкому чавуні подовження збільшується на 10–20%, а енергія розколу на 20–80% [7]. Корозійний опір до кислот модифікованих зразків із чавунів та сталей також поліпшується порівняно з немодифікованими у декілька разів.

Метою даної роботи стало дослідження змін структури та відносної зносостійкості металу, що нагріли дуговим способом, з попереднім або супутнім внесенням до зварювальної ванни нанопорош-

ків  $\text{SiO}_2$ .

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА

У дослідженнях використовували базове устаткування для електродугового зварювання та нагрівання: зварювальний автомат типу АДС-1000 (як джерело живлення — універсальний випрямляч ВДУ-506) та універсальна установка типу УД-209 УХЛ 4 з таким же джерелом живлення.

Введення наноматеріалу до зварювальної ванни здійснювали попереднім або супутнім нанесенням діоксиду кремнію на поверхню зразків.

За першою схемою нанопорошок  $\text{SiO}_2$  вводили до зварювальної ванни в суміші з флюсом після їх перемішування у планетарному млині в певних пропорціях, попередньо обчисливши витрати флюса і нанопорошка на одиницю довжини шва (довжини ванни).

За другою схемою нанопорошок розмішували зі спиртом у спреї-балончику і одержану суміш перед нагріванням розпилювали по пластині. Під час нагрівання спирт випаровувався, залишаючи на поверхні пластини смугу нанопорошка, на який здійснювали нагрівання.

За третьою схемою нанопорошок наносили на поверхню пластини за допомогою парафінового стрижня. Заздалегідь рідкий парафін і нанопорошок спеціальним пристроєм розмішували в циліндричній ємності, добиваючись рівномірного розподілу нанопорошка у парафіні, а після охолодження і витягання з ємності одержували циліндричний стрижень, яким наносили смуги на поверхню деталі. У процесі нагрівання при нагріванні вище  $40^\circ\text{C}$  парафін випаровувався і на поверхні пластини залишався лише нанопорошок ( $\text{SiO}_2$ ), на який здійснювали нагрівання.

Нагрівання виконували на зразки зі сталі 09Г2С дротами Нп-30ХГСА під флюсом АН-60 та Св-08Г2С під флюсом АН-348А (діаметр дротів — 2 мм) за режимом: зварювальний струм  $I_{\text{зв}} = 300 \pm 10$  А, напруга на дузі  $U_{\text{д}} = 30 \pm 1$  В, швидкість нагрівання  $v_{\text{зв}} = 16$  м/год, крок нагрівання  $h = 20$  мм.

За умов тертя металу по металу випробування на зносостійкість проводили на машині тертя типу СМЦ-2 за схемою вал–колодка на зразках завдовжки 20 мм і шириною 10 мм. Як контрольне тіло використовували диск діаметром 50 мм зі сталі У8 твердістю 400–450 HV. Умови випробувань: тиск на зразок —  $P = 0,1$  МПа, швидкість тертя —  $v = 0,8$  м/с, температура випробувань —  $T = 20^\circ\text{C}$ , тривалість випробувань — 2 години з вимірюваннями через кожні 15 хв.

Величину зношення, одержану у результаті випробування, визначали зважуванням або вимірюванням зразків до та після процесу стирання. Зважування зразків виконували на аналітичних тере-

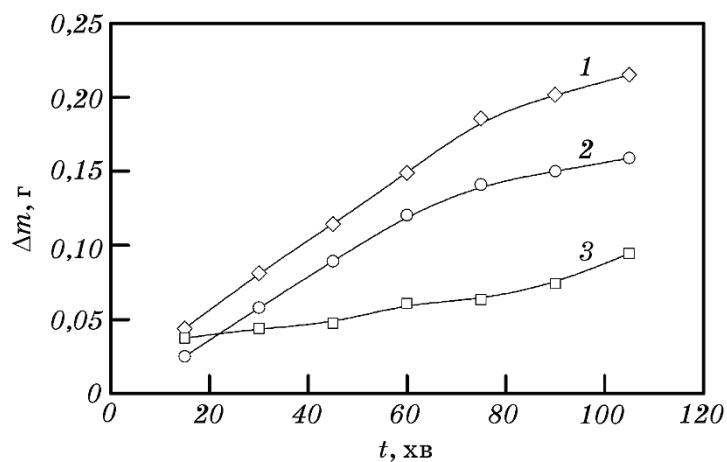
зах з точністю до 0,00001 г.

У дослідженнях використано твердомір ТК-2. Вивчення структури нагрітого металу проводили на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И-Selmi.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Вивчали ефективність схем введення нанопорошка до зварювальної ванни. Для коректності порівняння режим нагрівання зберігали незмінним. Взяли до уваги також той факт, що коефіцієнти переходу компонентів у зварювальну ванну під час нагрівання по присадці та під час легування через дріт неоднакові [8, 9]. Тому з'ясовувалося, за якою схемою можна досягти більшого переходу  $\text{SiO}_2$  у нагрітий метал і спричинити суттєвішу зміну у його структурі та зносостійкості.

Встановлено, що під час нагрівання дротом Нп-30ХГСА під пемзоподібним флюсом АН-60 втрата маси нагрітого металу у вихідному стані (без внесення додаткових матеріалів) становить  $\Delta m = 0,22$  г (рис. 1, крива 1). При нанесенні на поверхню нанопорошка  $\text{SiO}_2$  спреї-балончиком втрати маси складають  $\Delta m = 0,17$  г (рис. 1, крива 2), що підвищує зносостійкість у 1,3 рази. У суміші з флюсом за наявності у його складі 0,003% мас.  $\text{SiO}_2$  втрати маси складають  $\Delta m = 0,08$  г (рис. 1, крива 3), тобто спостерігається під-



**Рис. 1.** Вплив тривалості тертя на втрату маси під час нагрівання дротом Нп-30ХГСА: 1 — у вихідному стані, 2 —  $0,57\% \text{SiO}_2 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , 3 —  $0,003\% \text{SiO}_2 + \text{АН-60}$ .

**Fig. 1.** Effect of friction time on weight loss when surfacing wire: Нп-30ХГСА: 1—in the initial state, 2— $0,57\% \text{SiO}_2 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , 3— $0,003\% \text{SiO}_2 + \text{АН-60}$ .

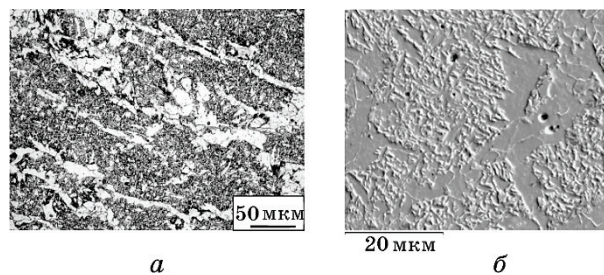
**ТАБЛИЦЯ 1.** Значення твердості нагрітих зразків.**TABLE 1.** The value of the hardness of the welded samples.

Зразок	Склад зразка	Виміри, <i>HV</i>	Середнє значення твердості, <i>HV</i>
1	Нп-30ХГСА	206, 236, 221, 206	217
2	Нп-30ХГСА + (0,003% SiO <sub>2</sub> + АН60)	221, 206, 236, 221	221
3	Нп-30ХГСА + (0,005% SiO <sub>2</sub> + АН60)	206, 221, 240, 221	222
4	Нп-30ХГСА + (0,006% SiO <sub>2</sub> + АН60)	322, 221, 240, 236	255
5	Нп-30ХГСА + (0,007% SiO <sub>2</sub> + АН60)	206, 199, 193, 280, 236, 221	221
6	Нп-30ХГСА + (0,57% SiO <sub>2</sub> + C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ОН)	274, 300, 297, 297	292

вищення зносостійкості у 2,75 разів. Аналіз даних вимірювання мікротвердості (табл. 1) вказує на певну кореляцію з даними випробувань зносостійкості. Так, якщо у вихідному стані середнє значення твердості становить 217 *HV*, то у решті випадків вона дещо більша (221, 222, 225 *HV*). Особливо помітно підвищення твердості при введенні нанооксидів до зварювальної ванни у суміші з флюсом АН-60 (255 *HV*) у кількості 0,006% SiO<sub>2</sub> та за спреї-технологією (0,57% SiO<sub>2</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>ОН), при якій твердість становить 292 *HV*. Саме ці умови відповідають максимальним значенням твердості одночасно з максимумом підвищення зносостійкості.

Проведено структурний аналіз зразків, що мали підвищені значення зносостійкості. Під час нагрівання дротом Нп-30ХГСА на сталь 09Г2С у вихідному стані формується структура, яка складається з полігонального фериту, що розташований на межах витягнутих зерен, та феритно-карбідної суміші з голчастою морфологією фериту, всередині зерен. Цементитні виділення достатньо збільшені (рис. 2).

Введення нанодвооксиду кремнію у суміші з флюсом призводить



**Рис. 2.** Структури металу валиків у вихідному стані під час нагрівання на сталь 09Г2С дротом Нп-30ХГСА: *а* — збільшення  $\times 320$ , *б* — збільшення  $\times 2000$ .

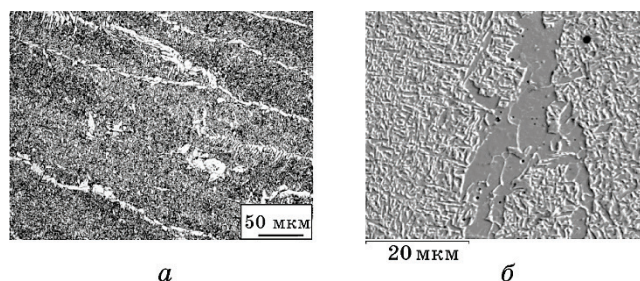
**Fig. 2.** Structures of metal rollers in the initial state when deposited on steel 09Г2С by wire of Нп-30ХГСА: *a*—magnification  $\times 320$ , *b*—magnification  $\times 2000$ .

до формування структури, що являє собою комбінацію фериту з різною морфологією: полігонального фериту на границях зерен, від якого росте відманштетний ферит та різнонапрямлені пластини голчастого фериту. Внутрішньозеренна структура має феритно-карбідний склад та дуже дисперсну структуру. Таке поєднання структурних складових позитивно впливає на зносостійкість (рис. 3).

Ефективність схем введення до зварювальної ванни нанопорошка змінюється залежно від системи легування електродного матеріалу. Так, під час натоплення дротом Св-08Г2С без внесення додаткового матеріалу втрата маси зразка при зношуванні становить  $\Delta m = 0,45$  г (рис. 4, крива 1), а у решті випадків суттєво зменшується. Наприклад, у суміші з флюсом при наявності у його складі 0,003%  $\text{SiO}_2$  втрата маси складає  $\Delta m = 0,22$  г (рис. 4, крива 2), тобто спостерігається підвищення зносостійкості вдвічі. У разі застосування спреї-технології (2,5 г  $\text{SiO}_2$  на 64 мл  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) в один шар, ефект підвищення зносостійкості подібний натопленню у суміші нанопорошка з флюсом (рис. 4, крива 3), а при 0,1 г  $\text{SiO}_2$  на 65 мл  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$   $\Delta m = 0,12$  г (рис. 4, крива 4), що вказує на підвищення зносостійкості, відповідно у 3,75 разів.

Аналіз даних вимірювання мікротвердості (табл. 2) вказує на зменшення значень твердості металу при введенні до зварювальної ванни наноксидів.

Так, якщо у вихідному стані середнє значення твердості становить 233  $HV$ , то у решті випадків воно менше (165, 187, 218  $HV$ ). Особливо помітно зменшення твердості при введенні наноксидів до зварювальної ванни у суміші з флюсом АН-348 (165  $HV$ ) та за спреї-технологією (0,05%  $\text{SiO}_2 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ), при якій твердість становить 187  $HV$ . До твердості у вихідному стані дещо наближається



**Рис. 3.** Структури металу валиків у випадку введення наноксиду кремнію у суміші з флюсом (натоплення на сталь 09Г2С дротом Нп-30ХГСА: *а* — збільшення  $\times 320$ , *б* — збільшення  $\times 2000$ ).

**Fig. 3.** Structures of metal rollers when introducing silicon nanosilicate in a mixture with flux (surfacing on steel 09Г2С by wire of Нп-30ХГСА: *a*—magnification  $\times 320$ , *б*—magnification  $\times 2000$ ).

значення 218  $HV$  у разі введення до зварювальної ванни 0,002%  $SiO_2 + C_2H_5OH$ .

Таким чином, за даною системою легування на відміну від попередньої не спостерігається разом з підвищенням зносостійкості підвищення твердості.

Випробування зносостійкості у випадку введення до зварювальної ванни нанопорошків, закріплених парафіном, показали, що у вихідному стані (нагрівання дротом Нп-30ХГСА на сталь 09Г2С) втрата маси металу становить  $\Delta m = 0,27$  г (рис. 5, крива 1), а у решті випадків зменшується.

При цьому спостерігається залежність втрат маси від кількості

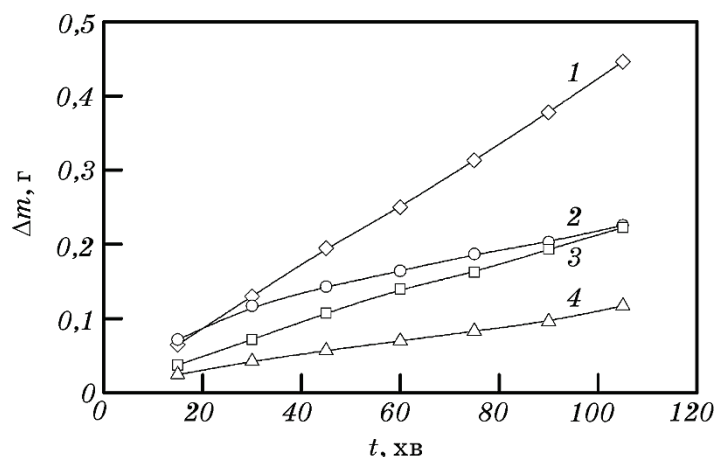


Рис. 4. Вплив тривалості тертя на втрату маси під час нагрівання дротом Св-08Г2С: 1 — у вихідному стані, 2 — АН-348 + 0,003%  $SiO_2$ , 3 — 2,5 г  $SiO_2$  на 64 мл  $C_2H_5OH$ , 4 — 0,1 г  $SiO_2$  на 65 мл  $C_2H_5OH$ .

Fig. 4. Influence of friction time on weight loss during welding with a wire Св-08Г2С: 1—in the initial state, 2—АН-348 + 0,003%  $SiO_2$ , 3—2.5 g of  $SiO_2$  in 64 ml of  $C_2H_5OH$ , 4—0.1 g of  $SiO_2$  in 65 ml of  $C_2H_5OH$ .

ТАБЛИЦЯ 2. Значення твердості нагрітих зразків.

TABLE 2. The value of the hardness of the welded samples.

Зразок	Склад зразка	Виміри, $HV$	Середнє значення твердості, $HV$
7	Св-08Г2С	221, 254, 236, 221	233
8	Св-08Г2С + (0,003% $SiO_2$ + АН-348)	158, 160, 160, 181	165
9	Св-08Г2С + (0,002% $SiO_2$ + $C_2H_5OH$ )	230, 221, 206, 214	218
10	Св-08Г2С + (0,05% $SiO_2$ + $C_2H_5OH$ )	181, 193, 193, 193, 175	187

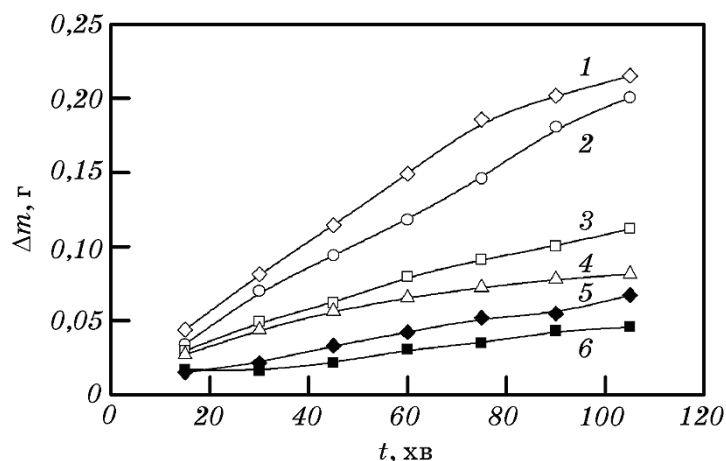


нанесеного на поверхню зразка двооксиду кремнію. При його вмісті у парафіні від 0,055 до 0,077% втрати маси зменшуються з  $\Delta m = 0,2$  г до  $\Delta m = 0,07$  г — рис. 5, криві 2, 3 і 4 відповідно. Максимальне зниження втрат маси металу має місце при кількості двооксиду кремнію 0,125% і 0,15%, при яких  $\Delta m = 0,06$  г і  $\Delta m = 0,05$  г відповідно, що вказує на підвищення зносостійкості у середньому в 5 разів. Зазначену присутність діоксиду кремнію у парафіні варто розглядати як оптимальну для такої схеми введення нанопорошка.

Аналіз даних вимірювання мікротвердості (табл. 3) вказує на збільшення значень твердості металу при введенні до зварювальної ванни наноксидів. Якщо у вихідному стані (під час нагрівання без внесення нанопорошків) середнє значення твердості становить 215 *HV*, то у випадку введення нанопорошків до зварювальної ванни показник сягає 250 *HV*.

У разі введення діоксиду кремнію у суміші з парафіном формується структура, яка містить полігональний і відманштетний ферит на межах зерен та суміші голчастого фериту і карбіду всередині зерна, з помітно більшою кількістю дрібних цементитних виділень (рис. 6), що пояснює підвищення зносостійкості матеріалу.

Відмінність вислідної структури нагрітого за розглянутими схемами металу, як вбачається, є наслідком не лише відомої різни-

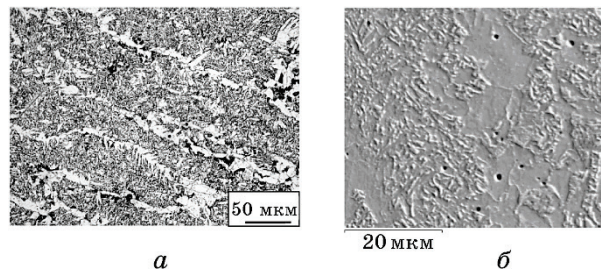


**Рис. 5.** Вплив часу тертя на втрату маси під час нагрівання дротом Hn-30XGCA: 1 — у вихідному стані, 2 —  $\text{CnH}_{2n+2} + 0,055\% \text{SiO}_2$ , 3 —  $\text{CnH}_{2n+2} + 0,067\% \text{SiO}_2$ , 4 —  $\text{CnH}_{2n+2} + 0,077\% \text{SiO}_2$ , 5 —  $\text{CnH}_{2n+2} + 0,125\% \text{SiO}_2$ , 6 —  $\text{CnH}_{2n+2} + 0,15\% \text{SiO}_2$ .

**Fig. 5.** Influence of friction time on weight loss during surfacing with the wire Hn-30XGCA: 1—in the initial state, 2— $\text{CnH}_{2n+2} + 0,055\% \text{SiO}_2$ , 3— $\text{CnH}_{2n+2} + 0,067\% \text{SiO}_2$ , 4— $\text{CnH}_{2n+2} + 0,077\% \text{SiO}_2$ , 5— $\text{CnH}_{2n+2} + 0,125\% \text{SiO}_2$ , 6— $\text{CnH}_{2n+2} + 0,15\% \text{SiO}_2$ .

**ТАБЛИЦЯ 3.** Значення твердості нагнаних зразків.**TABLE 3.** The value of the hardness of the welded samples.

Зразок	Склад зразка	Виміри, $HV$	Середнє значення твердості, $HV$
11	Нп-30ХГСА ( $CnH_{2n+2} + 0,055\% SiO_2$ )	254, 193, 236, 206	222
12	Нп-30ХГСА ( $CnH_{2n+2} + 0,067\% SiO_2$ )	221, 236, 221, 236	229
13	Нп-30ХГСА ( $CnH_{2n+2} + 0,077\% SiO_2$ )	221, 236, 221, 236	229
14	Нп-30ХГСА ( $CnH_{2n+2} + 0,125\% SiO_2$ )	221, 221, 254, 274, 206	235
15	Нп-30ХГСА ( $CnH_{2n+2} + 0,150\% SiO_2$ )	274, 254, 236, 236	250

**Рис. 6.** Структури металу валиків при введенні наноксиду кремнію у суміші з парафіном (нагнення на сталь 09Г2С дротом Нп-30ХГСА: *a* — збільшення  $\times 320$ , *б* — збільшення  $\times 2000$ ).**Fig. 6.** Structures of metal rollers in the introducing of silicon nanosilicate in a mixture with paraffin (surfacing on steel 09Г2С by wire of Нп-30ХГСА: *a*—magnification  $\times 320$ , *б*—magnification  $\times 2000$ ).

ці у коефіцієнті переходу речовини у зварювальну ванну, але й різної тривалості контактування нанопорошка з розтопом, місцем початку залучення його часток у потік рідкого металу та, як наслідок, неоднаковим ступенем збереження від повного розтоплення наночасток діоксиду кремнію.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Показано, що при внесенні до зварювальної ванни нанопорошка  $SiO_2$  відбувається зміна зносостійкості та твердості нагнаних шарів. Ступінь зміни зазначених показників залежить від матеріялу нагненого дроту та способу введення наноматеріалу до зварювальної ванни.
2. Неоднозначність зміни твердості та зносостійкості нагненого за різними схемами металу спричинена неоднаковістю коефіцієнтів переходу речовини у зварювальну ванну, різною тривалістю конта-

ктування нанопорошка з розтопом, місцем початку залучення його часток у потік рідкого металу та, як наслідок, неоднаковим ступенем збереження від повного розтоплення наночасток діоксиду кремнію.

3. Встановлено, що найвищі показники зносостійкості мають зразки, натоплені дротом Нп-30ХГСА у випадку внесення до зварювальної ванни нанопорошка, закріпленого парафіном у кількості 0,15%  $\text{SiO}_2$ . Найбільші показники твердості спостерігаються у разі внесення до зварювальної ванни діоксиду кремнію у суміші з флюсом АН-60 (0,006%  $\text{SiO}_2$ ) та спреї-технології (0,57%  $\text{SiO}_2 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ).

4. Зміна зносостійкості пов'язана зі структурно-фазовим складом натопленого металу. Підвищення зносостійкості пропорційне відношній кількості цементитних виділень, а підвищення твердості — подрібненню феритно-карбідної складової структури.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ю. С. Карабасова, *Новые материалы* (Москва: МИСиС, 2002).
2. І. К. Походня, В. В. Головка, С. М. Степанюк, Д. Ю. Ермоленко, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, No. 6: 68 (2012).
3. В. В. Головка, С. Н. Степанюк, Д. Ю. Ермоленко, *Автоматическая сварка*, № 2: 16 (2015).
4. В. В. Головка, В. Д. Кузнецов, С. К. Фомічов, П. І. Лобода, *Нанотехнології у зварюванні низьколегованих високоміцних сталей* (Київ: НТУУ «КПІ»: Політехніка: 2016).
5. Г. Н. Соколов, И. В. Лысак, А. С. Трошков, И. В. Зорин, С. С. Горемыкина, А. В. Самохин, Н. В. Алексеев, Ю. В. Цветков, *Физика и химия обработки материалов*, № 6: 41 (2009).
6. П. І. Лобода, В. Д. Кузнецов, І. В. Смирнов, М. О. Сисоєв, К. П. Шаповалов, *Прогресивні технології і системи машинобудування*, 1, №1: 174 (2014).
7. В. А. Полубояров, Гао Хонг, Чен Меилинг, *Сб. труд. Второй Всеросс. конф. по наноматериалам «НАНО 2007» (13–16 марта 2007 г.)* (Новосибирск: Наука: 2007), с.75.
8. И. И. Фрумин, *Автоматическая электродуговая наплавка* (Харьков: Металлургиздат: 1961).
9. И. А. Рябцев, И. К. Сенченков, *Теория и практика наплавочных работ* (Киев: Экотехнология: 2013).

## REFERENCES

1. Yu. S. Karabasova, *Novye Materialy* [New Materials] (Moscow: MISiS: 2002) (in Russian).
2. I. K. Pokhodnya, V. V. Holovko, S. M. Stepanyuk, and D. Yu. Yermolenko, *Physicochemical Mechanics of Materials*, No. 6: 68 (2012) (in Ukrainian).
3. V. V. Golovko, S. N. Stepanyuk, and D. Yu. Ermolenko, *Paton Welding J.*, No. 2: 14 (2015).

4. V. V. Holovko, V. D. Kuznetsov, S. K. Fomichov, and P. I. Loboda, *Nanotekhnolohiyi u Zvaryuvanni Nyzkolehovanykh Vysokomitsnykh Staley* [Nanotechnology in Welding Low-Alloy High-Strength Steels] (Kyiv: NTUU 'KPI': Politekhnik: 2016) (in Ukrainian).
5. G. N. Sokolov, I. V. Lysak, A. S. Troshkov, I. V. Zorin, S. S. Goremykina, A. V. Samokhin, N. V. Alekseev, and Yu. V. Tsvetkov, *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, No. 6: 41 (2009) (in Russian).
6. P. I. Loboda, V. D. Kuznetsov, I. V. Smyrnov, M. O. Sysoyev, and K. P. Shapovalov, *Prohresyvni Tekhnologiyi i Systemy Mashynobuduvannya*, 1, No. 1: 174 (2014) (in Ukrainian).
7. V. A. Poluboyarov, Gao Khong, and Chen Meiling, *Sb. Trud. Vtoroy Vseross. Conf. po Nanomaterialam 'NANO 2007' (March 13–16, 2007)* (Novosibirsk: Nauka: 2007), p. 75 (in Russian).
8. I. I. Frumin, *Avtomaticheskaya Elektrodugovaya Naplavka* [Automatic Arc Surfacing] (Kharkov: Metallurgizdat: 1961) (in Russian).
9. I. A. Ryabtsev and I. K. Senchenkov, *Teoriya i Praktika Naplavochnykh Rabot* [Theory and Practice of Surfacing] (Kiev: Ekotekhnologiya: 2013) (in Russian).