

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**СТЕПАНОВ ДЕНИС ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 621.791.927.5

**ДУГОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОГО МЕТАЛУ ІЗ  
ЗАСТОСУВАННЯМ НАНОПОРОШКІВ ОКСИДІВ**

Спеціальність 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертація є рукописом

Роботу виконано на кафедрі інженерії поверхні Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Київ

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Кузнецов Валерій Дмитрович,**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Головко Віктор Володимирович**  
Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, завідувач відділом

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Петров Станіслав Володимирович**  
Інститут газу НАН України, провідний науковий співробітник

Захист відбудеться «16» січня 2017 р. о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.15 НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», за адресою: м. Київ-56, проспект Перемоги, 37, корп. 19, ауд.435.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Автореферат розіслано «12» грудня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради Д26.002.15

Р.М. Рижов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У різних галузях промисловості експлуатація деталей машин і конструкцій відбувається під дією зовнішніх факторів, які притаманні специфічним умовам їх роботи. Серед таких факторів, що відображають особливості експлуатації, найчастіше проявляються ті чи інші види зношування, які, в решті решт, суттєво скорочують ресурс роботи деталей машин і конструкцій.

У вирішенні задач подовження ресурсу роботи виробів значна роль відводиться процесам їх відновлення, зокрема, наплавленням. З цією метою розроблені наплавні матеріали, здатні протидіяти різним видам зношування, які на сьогодні класифіковано як механічні і корозійно-механічні.

Відповідно до перелічених видів зношування рекомендовані матеріали для наплавлення, які також класифіковано за хімічним складом, структурними ознаками, твердістю та призначенням. Наприклад, для умов тертя металу по металу рекомендовано наплавлений метал типу нелегованих або низьколегованих сталей з вмістом вуглецю до 0.4%. У даному випадку підвищення зносостійкості введенням додатково легуючих елементів обмежується зношуванням спряжених пар.

При аналізі систем легування рекомендованих матеріалів не випадково виділено структурний фактор, оскільки він відіграє значну роль у підвищенні зносостійкості. Саме тому, одним із напрямів підвищення зносостійкості без змін систем легування традиційно є введення на базі рідкоземельних елементів модифікаторів, що сприяють зародкоутворенню і покращують структуру наплавленого металу.

Останні десятиріччя значного розвитку набули наноматеріали і нанотехнології. Відомий позитивний досвід застосування наноматеріалів при зварюванні. Систематичні дослідження в ІЕЗ ім. Є.О. Патона і НТУУ «КПІ» при зварюванні низьколегованих високоміцних сталей показали, що неметалеві включення (карбіди, нітриди, оксиди) нанорозмірного діапазону у металі швів як екзогенного походження, так і введені до зварювальної ванни як нанопорошкові матеріали суттєво змінюють їх структуру, зокрема, умови формування голчастого фериту, який поєднує підвищені показники міцності і в'язкості.

За літературними даними відомості щодо їх впливу на зносостійкість наплавленого металу вкрай обмежені, хоча наявний досвід застосування як наноматеріалів оксидів при плазмово-порошковому наплавленні, так і наноматеріалів карбідів в покритті електродів вказує на їх перспективність у наплавних процесах. Недостатність результатів досліджень у цьому напрямку утруднює розробку і використання перспективних технологій відновлення зношених поверхонь деталей і конструкцій наплавленням.

Таким чином, дослідження зносостійкості поверхонь деталей і конструкцій при застосуванні стандартних систем легування з одночасним введенням до зварювальної ванни нанопорошкових матеріалів і встановленням закономірностей впливу наноконпонентів на структуру, фазовий склад і властивості наплавленого металу є актуальною науково-технічною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі інженерії поверхні НТУУ «КПІ» відповідно до планів фундаментальних та прикладних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України «Дослідження впливу наноутворень на формування мікроструктури зварних швів високоміцних низьколегованих сталей для експлуатації в екстремальних

умовах» (№ ДР 0112U006483, 2012-2013 рр.), «Підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей і конструкцій нанесенням модифікованих наноутвореннями покриттів» (№ ДР 0114U003428, 2014-2015рр.); «Розроблення технології відновлення та підвищення зносостійкості деталей гусеничної техніки на основі використання порошкових матеріалів» (№ ДР 0115U001973, 2015-2016 рр.).

**Мета роботи і задачі дослідження.** Підвищення зносостійкості деталей і конструкцій, що працюють в умовах абразивного зношування та тертя металу по металу на основі досліджень структурного і фазового стану поверхневих шарів та їх взаємозв'язку з вмістом і складом наноконпонентів і показниками зносостійкості.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання:

- проаналізувати можливі схеми введення нанопорошкових матеріалів у зварювальну ванну і розробити схеми прийнятні для технологічних умов наплавлення;
- дослідити вплив масових часток наноконпонентів на зносостійкість в умовах сухого тертя металу по металу та абразивного зношування;
- дослідити вплив масових часток наноконпонентів на структуроутворення наплавленого шару та його мікротвердість;
- дослідити вплив розподілу, складу та морфології неметалевих включень на структурний та фазового стан наплавленого металу;
- визначити вміст наноконпонентів у металі наплавленого валика в залежності від змін погонної енергії;
- розробити технологічні рекомендації щодо наплавлення зносостійкого шару з введенням до зварювальної ванни наноконпонентів.

**Об'єкт дослідження** - наплавлений метал сформований в умовах введення до зварювальної ванни наноконпонентів.

**Предмет дослідження** - зносостійкість, структура і фазовий стан наплавленого металу та їх взаємозв'язок зі складом та вмістом наноконпонентів.

**Методи досліджень.** Дослідження зносостійкості в умовах сухого тертя металу по металу проводили за схемою диск – колодка на машинах СМЦ-2, М-22М шляхом вимірювання втрат маси зразків на протязі певного часу чи шляху випробувань. Випробування на абразивне спрацьовування проводили на установці ЛКІ-3 за схемою зношування через абразивний прошарок. Мікротвердість вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3. Дослідження структур і неметалевих включень проводили методами оптичної і електронної мікроскопії з використанням мікроскопу Neophot–21, електронного скануючого мікроскопу JSM35CF з пристроєм для локального рентгеноспектрального аналізу INCAEnergy 350, а також комп'ютерних програм, розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона для аналізу розподілення включень за розмірами і складом. Теплофізичні характеристики литого металу досліджували на термоаналізаторі DSK 404 F1 фірми NETZSCH.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Експериментально доведено, що незначні масові частки наноконпонентів (до 0.63% мас. частки) підвищують зносостійкість наплавленого металу, але ефективність підвищення проявляється по різному залежно від типу нанопорошків та умов наплавлення. Так, при наплавленні середньовуглецевої низьколегованої композиції самозахисним дротом з введенням нанопорошків  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  і  $SiO_2$  з масовими частками у ванні 0.31%, 0.36%, 0.63% відповідно зносостійкість підвищується відповідно в 1.6, 3.8 і 5 разів, а при наплавленні такої композиції під флюсом введення, на-

приклад, нанопорошку  $\text{SiO}_2$  масовою часткою 0.04% підвищує зносостійкість у 3 рази.

2. Показано, що при наплавленні середньовуглецевої низьколегованої композиції самозахисним дротом з введенням нанопорошків  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  із масовими частками у ванні 0.31%, 0.36%, спостерігається подрібнення мартенситної і бейнітної складових структури з виділенням по границях зерен карбідів і оксидів, що сприяє підвищенню зносостійкості, а при введенні нанопорошку  $\text{SiO}_2$  масовою часткою 0.63% формується мартенситна структура. При наплавленні середньовуглецевої низьколегованої композиції під флюсом введення 0.07%  $\text{SiO}_2$  призводить до значно більшої кількості включень, розташованих по границях феритної фази і формуванню структур переважно голчастого фериту, який поєднує високоміцнісні і в'язкі властивості і, таким чином, сприяє підвищенню зносостійкості.

3. Встановлено, що для умов тертя металу по металу при наплавленні високолегованих композицій введення до зварювальної ванни 0.04%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і 0.07%  $\text{TiO}_2$  через спечену лігатуру більш ефективно, підвищення зносостійкості (у 3.2 рази) при таманне нанопорошку оксиду алюмінію, при внесенні суміші з ґрунтовкою зносостійкість металу з  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та  $\text{TiO}_2$  (масова частка 0.04%) є приблизно на однаковому рівні (у 2 рази більше ніж у металу у вихідному стані), а діоксиду кремнію (масова частка 0.01%) більш ніж у 3 рази.

4. Показано, що при наплавленні середньовуглецевої високолегованої композиції в середовищі захисного газу при введенні нанокомпонентів  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $\text{TiO}_2$  масовими частками до 0.08% та 0.07% відповідно зменшується блочність мартенситних виділень, а кількість неметалевих включень збільшується з формуванням ланцюжків по межах зерен.

5. Для умов абразивного зношування при наплавленні композиції високохромистого чавуну ефект підвищення зносостійкості при введенні нанопорошків  $\text{Al}_2\text{O}_3$  у вигляді спеченого стрижня масовою часткою 0.08%, та у вигляді суміші з ґрунтовкою масовою часткою 0.46% виявляється меншою мірою (на 35% та 30% відповідно) у порівнянні з композиціями, рекомендованими для умов тертя металу по металу.

6. Показано, що при наплавленні середньовуглецевої низьколегованої композиції під шаром флюсу у вихідному стані об'ємна частка неметалевих включень становить 0.31% і відповідає, в основному, розмірному діапазону 0.07 – 0.85 мкм, а при введенні у зварювальну ванну нанопорошку діоксиду кремнію об'ємна частка включень збільшується до 0.56% і приходиться на дещо менший розмірний діапазон 0.07 – 0.61 мкм.

7. За результатами аналізу морфології та хімічного складу включень для умов наплавлення середньовуглецевої низьколегованої композиції під шаром флюсу встановлено, що у вихідному стані ядро включення містить, в основному, алюмосилікат марганцю, а при введенні діоксиду кремнію поряд з ними присутні і більш тверді включення оксиду алюмінію (корунду), що при збільшенні їх об'ємної частки і пояснює більш ефективний вплив нанопорошку  $\text{SiO}_2$  на зносостійкість наплавленого металу.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Розроблено способи введення нано порошкових матеріалів у зварювальну ванну (Патенти України на корисну модель № 98985, № 105188), які дозволяють за-

безпечувати контрольований вміст наноконпонентів у зварному шві чи наплавленому металі.

Запропоновано методикау визначення вмісту наноконпонентів у зварювальній ванні і, відповідно, у наплавленому валику для різних композицій наплавленого металу і умов наплавлення.

Розроблено технологічні рекомендації для дугового наплавлення з введенням до зварювальної ванни наноконпонентів, які забезпечують підвищення зносостійкості поверхневих шарів.

Розроблені технологічні рекомендації пройшли дослідно – виробничу перевірку при відновленні трамвайних коліс у депо ім. Т.Г. Шевченка, м. Київ.

Отримані результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі для підготовки фахівців зі спеціальностей 131 – Прикладна механіка та 132 – Матеріалознавство, під час викладання дисциплін «Технологія та обладнання для наплавлення», «Наплавлення та напилення», «Технологія зміцнення поверхонь» на кафедрі інженерії поверхні НТУУ «КПІ».

**Особистий внесок здобувача** полягає у постановці мети і задач роботи, плануванню та організації експериментів з наплавлення, випробовування на зносостійкість, вимірюванні твердості, аналізі мікроструктур наплавленого металу, розподілу, складу та морфології неметалевих включень.

Автором було розраховано вміст наноконпонентів у зварювальній ванні, а відтак, у наплавленому валику.

При підготовці публікацій внесок автора був істотним.

**Апробація результатів досліджень.** Основні наукові положення дисертації доповідалися на: VII Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов "Сварка и родственные технологии" (м. Ворзель, 2013); Сьома всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників "Зварювання та споріднені процеси і технології" (м. Київ, 2014); Інженерія поверхні. Комплексний підхід. Перша всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, спірантів та наукових співробітників (м. Київ, 2014); Восьма всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників „Зварювання та споріднені процеси і технології” ( м. Київ, 2015); Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій. Всеукраїнська науково-технічна конференція присвячена 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. адм. Макарова (м. Миколаїв, 2014); II Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників "Інженерія поверхні. Комплексний підхід" (м. Київ; 2015); Досконалість зварювання - комплексний підхід. IX Всеукраїнська науково-технічна конференція (м. Київ, 2015).

**Публікації.** Результати дисертації представлені у 17 опублікованих роботах: 6 статтях у наукових фахових виданнях, 2 з яких включені до міжнародних наукометричних баз, 2 патентах України, 9 тез доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура і об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний об'єм роботи – 157 сторінок машинописного тексту, у тому числі 79 рисунків, 37 таблиць, список використаних джерел із 101 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи і задачі досліджень, описано об'єкт, предмет і методи досліджень, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

**У першому розділі** показано актуальність вирішення проблеми підвищення ресурсу роботи деталей машин і конструкцій на базі розробки нових підходів до підвищення їх зносостійкості

З аналізу численних публікацій виявлено, що в проблемі підвищення зносостійкості поверхонь суттєву роль відіграє їх структурний і фазовий стан. Саме тому відповідно до класифікації міжнародного інституту зварювання матеріали для наплавлення поділено на групи за хімічним складом, структурними ознаками, твердістю та призначенням.

Відмічається, що підвищення ефективності застосування наплавних матеріалів має два шляхи вирішення – або розробка і застосування нових легуючих систем, або пошук нових підходів щодо керування структурою і властивостями наплавленого металу без зміни системи легування. Перспективним напрямком підвищення зносостійкості з використанням рекомендованих матеріалів без змін систем легування може бути вплив на структурний фактор введенням у зварювальну ванну модифікаторів, які впливають на умови кристалізації, розмір первинної структури і, відповідно, властивості наплавлених валиків.

За останні роки значного розвитку набули наноматеріали і нанотехнології, досвід використання яких відомий у великій металургії, порошковій металургії, литті тощо.

Виявлено позитивний вплив нанопорошкових матеріалів на структуру і властивості швів при різних способах зварювання, але дані про їх вплив на структуру і зносостійкість у процесах наплавлення вкрай обмежені, що і обумовлює своєчасність і актуальність проведення досліджень у цьому напрямку.

**У другому розділі** описано обладнання та матеріали, що використовувались під час експериментів, способи отримання сумішей з наноконпонентами та методи їх введення до зварювальної ванни, наведено методику розрахунку частки наноконпонентів у зварювальній ванні, описано методики випробування зносостійкості наплавленого металу, металографічного аналізу та його мікротвердості.

З метою виявлення загальних закономірностей впливу наноконпонентів наплавлення проводили, використовуючи різні основні матеріали (сталі марок Ст3сп; Ст. 09Г2С; Ст. 45) і наплавні (дроти ПП-Нп-40Х13 діаметром 2мм, АН-180 (аналог стрічки ПЛ-АН-180) діаметром 2.7 мм., 25ХГ2С діаметром 2.2 мм., Нп-30ХГСА діаметром 2.5 мм) як під флюсом АН-60, так і у газовій суміші МІХ-1: 82%Ar+18%CO<sub>2</sub>

В дослідженнях застосовували нанопорошки оксиду алюмінію (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), оксиду титану (TiO<sub>2</sub>) фракцією 21-41нм, аеросил (SiO<sub>2</sub>) фракцією 5-40 нм та вуглецевомісне нановолокно.

Дослідження проводили за різними схемами введення наноконпонентів у зварювальну ванну. Наноконпоненти вводили у зварювальну ванну у вигляді лігатури після пресування і спікання гомогенної суміші порошоків заліза фракцією 40 мкм і нанорозмірних порошоків оксиду алюмінію та оксиду титана (27-41нм) із заданим об'ємним чи масовим співвідношенням. Суміш спікалась у формі стрижня діаметром 3мм та довжиною 60мм.

За іншими, більш технологічними для наплавлення схемами, виготовлені у заданих об'ємних чи масових співвідношеннях суміші після їх механохімічної обробки у планетарному млині марки ХQM – 2, або нанопорошок, щоб уникнути розсіювання попередньо змішували з ґрунтовкою ГФ-021 або силікатним клеєм і наносили тонким шаром по ширині валика на довжину наплавлення.

Застосовували також виготовлені у заданих співвідношеннях після їх обробки в планетарному млині суміші нанопорошку з флюсом, які наносили на поверхню перед наплавленням.

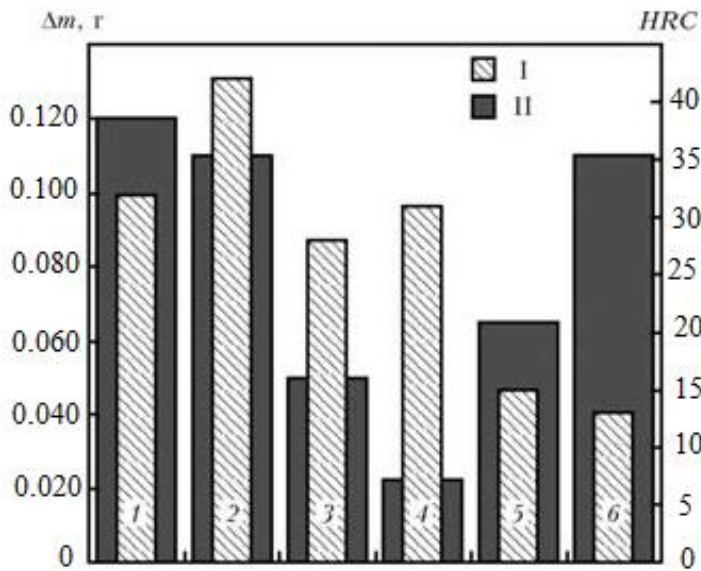


Рис. 1. Твердість (I) та знос по масі (II) наплавленого металу: 1 – У7; 2 – 30Х5Г5; 3 – 10Х10Г10; 4 – 60Х20Г9Н2МД; 5 – 20Х13Г6Н6МФД; 6 – 50Г11М.

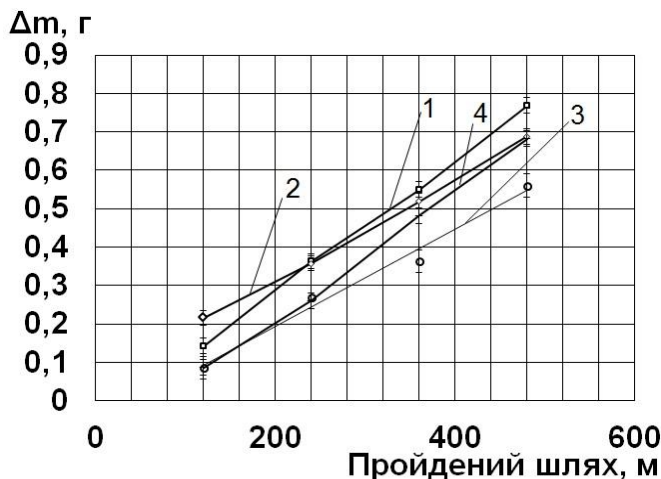


Рис. 2. Вплив пройденного шляху на втрату маси при наплавленні дротом ПП-АН-180 з нанопорошками оксидів: 1 – у вихідному стані; 2 – АН-180+0.05%  $Al_2O_3$ ; 3 – АН-180+0.46%  $Al_2O_3$ ; 4 – АН-180+0.05%  $TiO_2$ .

Розрахунок масових чи об'ємних часток нанопорошків у зварювальній ванні проводили відповідно до маси чи об'єму зварювальної ванни, які визначали за відомими формулами теорії зварювальних процесів.

Випробування наплавленого шару, що працює в умовах тертя металу по металу чи абразивного зношування проводили за стандартними методиками на машинах тертя М-22М, СМЦ-2 та установці ЛКИ-3. Мікроструктуру досліджували методами оптичної та електронної мікроскопії і рентгеноспектрального аналізу з використанням оптичного мікроскопа і растрового електронного мікроскопа.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень наплавленого металу на зносостійкість, структурні перетворення та твердість наплавленого металу.

При проведенні порівняльного аналізу зносостійкості матеріалів, рекомендованих для наплавлення виробів, що працюють в умовах тертя металу по металу та абразивного зношування було показано, що ефект їх застосування обмежений показниками зносостійкості та твердості, а 100% кореляція між твердістю та зносостійкістю відсутня (див. рис. 1).

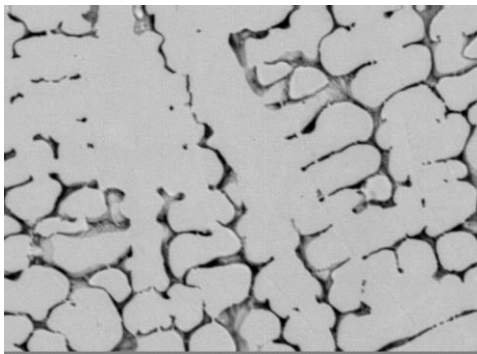
При проведенні досліджень зносостійкості до умов абразивного зношування при наплавленні дротом АН-180 та введенні до зварювальної ванни наноконпонентів встановлено їх позитивний вплив на властивості матеріалу валика. Так зносостійкість наплавленого шару зростає на



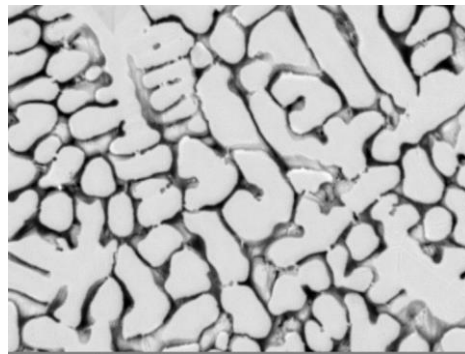
33% при використанні спечених стрижнів при внесенні 0.08%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та на 53% при використанні суміші з ґрунтовкою при внесенні 0.46%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (див. рис. 2).

Зносостійкість також змінюється за-лежно від складу та концентрації суміші. Так, метал валика з 0.05%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  має більшу зносостійкість в порівнянні з металом з  $\text{TiO}_2$  тої ж концентрації.

Поряд зі зміною зносостійкості наплавленого металу спостерігається і зміна структури. Так, у вихідному стані формується структура заевтектичного чавуну, яка характеризується достатньо крупними цементитними виділеннями в аустенітній матриці. Структура металу валика з нанопорошком  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0.08% мас. част. характеризується більш подрібненими цементитними виділеннями і, відповідно, меншим пи-



а)



б)

Рис. 3. Структури наплавленого металу дротом ПП-АН-180: а– у вихідному стані,  $\times 1000$ ; б– з додаванням  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з масовою часткою 0.08%,  $\times 1000$ .

томим навантаженням на одиницю поверхні при терті, що і обумовлює підвищення зносостійкості (рис.3).

Заміри мікротвердості показали, що при середньому значенні вихідного металу валика – 219  $HV$ , мікротвердість збільшилась при додаванні 0.08%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 280  $HV$ , за винятком 0.04%

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – 198  $HV$ .

При дослідженні зносостійкості та структурних змін при наплавленні середньовуглецевих високолегованих композицій для умов тертя металу по металу також спостерігається підвищення зносостійкості та структурні зміни як для наплавленого

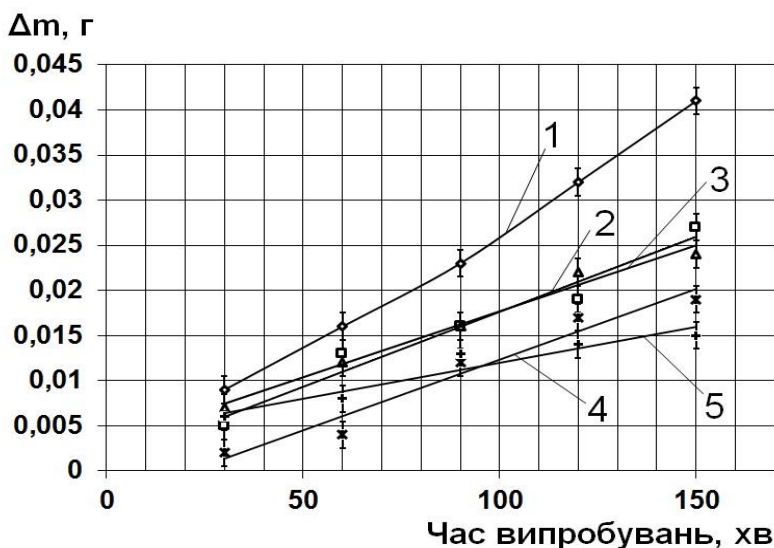


Рис. 4. Зносостійкість при наплавленні дротом ПП-Нп-40X13, наноконпоненти вводились у вигляді стрижня: 1 – у вихідному стані; 2 – 0.04%  $\text{TiO}_2$ ; 3 – 0.07%  $\text{TiO}_2$ ; 4 – 0.08%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 5 – 0.04%  $\text{Al}_2\text{O}_3$

металу, наноконпоненти до якого вводились за допомогою спечених стрижнів, так і для наплавленого металу, наноконпоненти до якого вводились за допомогою суміші скріпленої ґрунтовкою (Рис. 4, 5).

Максимальний ефект в металі наплавленому з використанням спеченого стрижня спостерігається при введенні в ванну  $\text{Fe}+0.04\%\text{Al}_2\text{O}_3$ , втрати по масі знижуються в 3.2 рази. При наплавленні з використанням ґрунтовки максимальний ефект спостерігається при введенні в ванну  $\text{Fe} + 0.01\% \text{SiO}_2$ , втрати по масі знижуються в 2.8 рази.

Мікроструктура наплавленого металу 40X13 представляє собою мартенсит з характерною для вихідних умов розвинутою крупногольчастою структурою. У випадку наплавлення з додаванням нанопорошків оксидів, у тому числі з додаванням  $\text{Fe} + 0.04\% \text{Al}_2\text{O}_3$  спостерігається помітно менша блочність мартенситних виділень з менш розвинутою голчастою будовою.

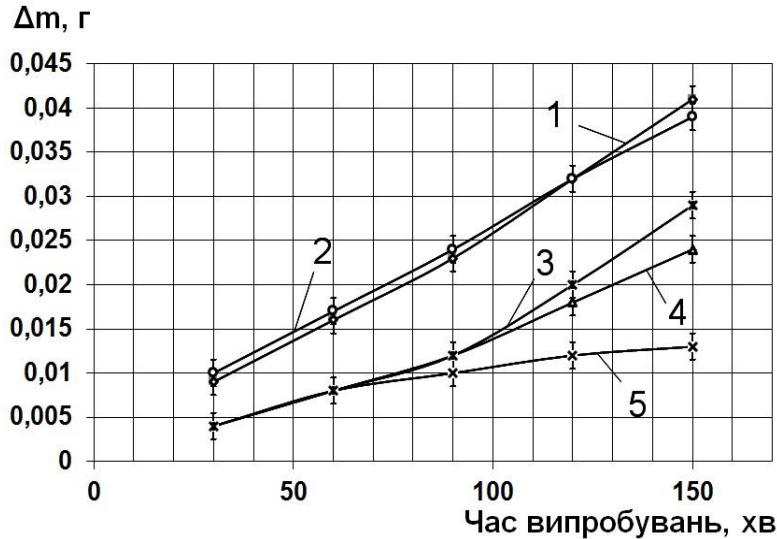


Рис. 5. Зносостійкість при наплавленні дротом ПП-Нп-40X13, наноконпоненти скріплені ґрунтовкою: 1 - у вихідному стані; 2 - 0.04 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3 - 0.04%  $\text{TiO}_2$ ; 4 - 0.04%  $\text{SiO}_2$ ; 5 - 0.01%  $\text{SiO}_2$

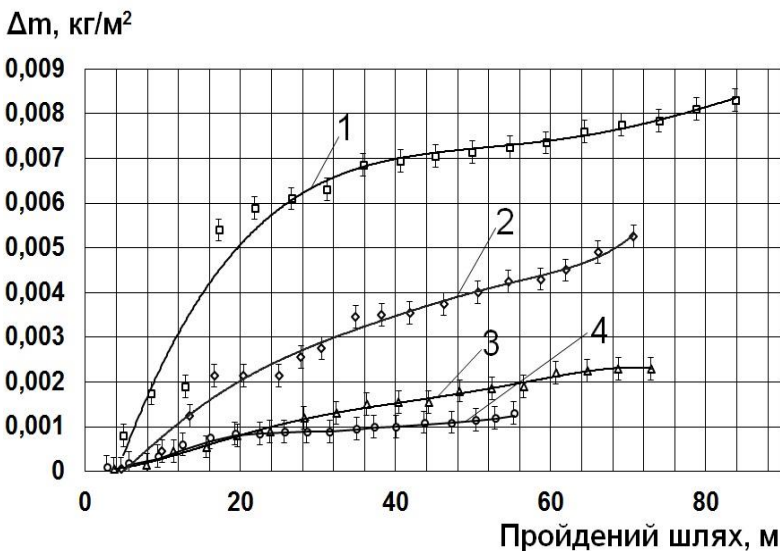


Рис. 6. Вплив пройденого шляху на втрату маси при наплавленні дротом 25ХГ2С, наноконпоненти вводились у вигляді порошку скріпленого ґрунтовкою: 1 - у вихідному стані; 2 - з 0.31 %  $\text{TiO}_2$ ; 3 - з 0.34 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 4 - з 0.63%  $\text{SiO}_2$

Втрати металу модифікованого оксидом кремнію на 82% менші ніж втрати не модифікованого металу.

Встановлено, що метал модифікований  $\text{SiO}_2$  є найбільш зносостійким в порівнянні з металом модифікованим  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та  $\text{TiO}_2$ . і враховуючи те, що аеросил промис-

Вимірювання мікротвердості показали, що при середньому значенні мікротвердості вихідного металу валика 530  $HV$  в інших випадках мікротвердість зменшувалась ( $\text{Fe} + 0.04\% \text{TiO}_2 - 478 HV$ ;  $\text{Fe} + 0.07\% \text{TiO}_2 - 461 HV$ ;  $\text{Fe} + 0.04\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 469 HV$ ) за винятком  $\text{Fe} + 0.08\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 553 HV$ .

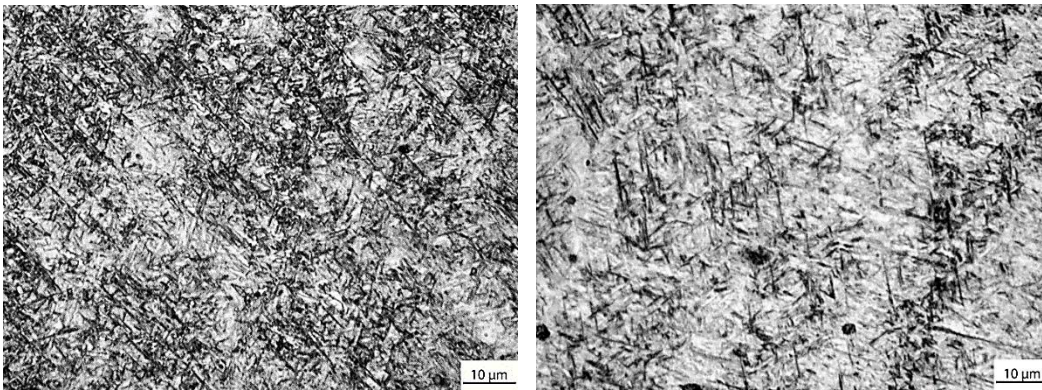
Виявлено, що при однакових концентраціях наноконпонентів у разі вводу наноконпонентів шляхом плавлення спеченого стрижня та змішаної лігатури скріпленої ґрунтовкою метал, модифікований за допомогою стрижня є більш стійким для умов зношування. Припускається, що це є наслідком того, що така схема вводу наноконпонентів дозволяє ввести у зварювальну ванну наноконпоненти з меншими втратами, проте схема вводу при нанесенні ґрунтовки є більш технологічною.

При наплавленні середньовуглецевих низьколегованих композицій самозахисним дротом при введенні до зварювальної ванни нанопорошків оксидів встановлено, що як оксид алюмінію, так і титану сприяє підвищенню зносостійкості наплавленого металу (порівн. криві 2, 3 та криву 1 вихідного валика рис.6). Максимальна зносостійкість спостерігається у випадку використання

лово виробляється і є дешевим та більш доступним в порівнянні з іншими нанопорошками оксидів, то дослідження з модифікування наплавленого металу нанопорошком  $\text{SiO}_2$  є перспективними та економічно обґрунтованими.

При наплавленні дротом 25ХГ2С метал вихідного валика має бейнітну структуру з незначною кількістю мартенситної складової (рис. 7, а), метал модифікований  $\text{SiO}_2$  – має чисто мартенситну структуру (рис. 7, б), що і визначає підвищення зносостійкості.

Вимірювання мікротвердості показали, що при середньому значенні вихідного металу валика 352 *HV* в інших випадках мікро твердість зменшувалася (0.31 %  $\text{TiO}_2$  – 271 *HV*, 0.36 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 313 *HV*) за винятком 0.63 %  $\text{SiO}_2$  – 424 *HV*.



а)

б)

Рис. 7. Структури наплавленого металу дротом 25ХГ2С: а – у вихідному стані; б – при введенні 0.63%  $\text{SiO}_2$ .

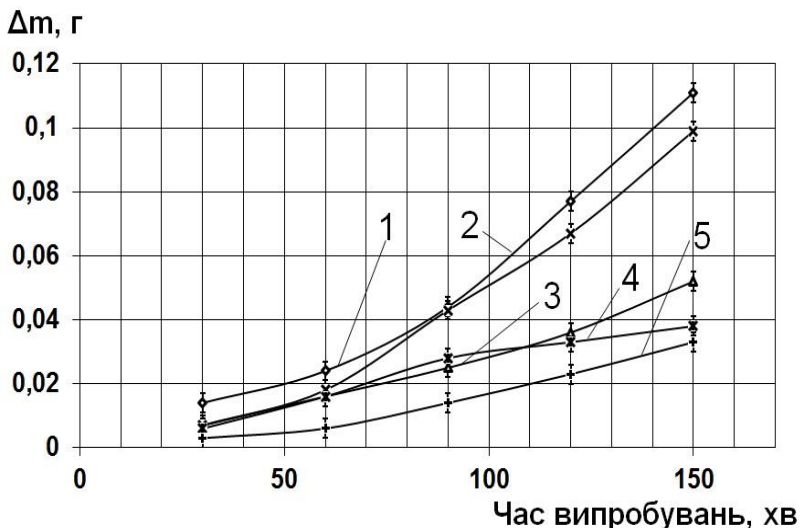


Рис. 8. Зносостійкість наплавленого металу дротом Нп-30ХГСА: 1 – у вихідному стані; 2 – з 0.43% вуглецевого волокна; 3 – з 0.94% вуглецевого волокна; 4 – з 0.07 %  $\text{SiO}_2$ ; 5 – з 0.04 %  $\text{SiO}_2$

вихідного валику являє собою ферито - цементитну суміш переважно внутризеренного фериту незначної дисперсності (рис. 9, а). При наплавленні з нанопорошком 0.07%  $\text{SiO}_2$  суттєво збільшується дисперсність ферито-цементитної суміші (рис. 9, б), що, ймовірно, пояснює підвищення зносостійкості. У випадку наплавлення діоксиду кремнію із залізним порошком як частинки носія діоксиду кремнію 0.04%  $\text{SiO}_2$  структура являє собою суміш полігонального і голчатого фериту (Рис. 9, в). Відомо,

Дослідження зносостійкості середньовуглецевих низьколегованих композицій наплавлених під шаром флюсу показали, що метал з 0.94% мас. частки вуглецевовмісного матеріалу є більш зносостійким в

порівнянні з металом у вихідному стані майже у 3 рази, для металу з 0.07%  $\text{SiO}_2$  і для металу з сумішшю  $\text{Fe}+0.04\%\text{SiO}_2$  зносостійкість збільшується у 2.4 та у 3.3 рази відповідно (рис. 8).

Також при наплавленні дротом Нп-30ХГСА відмічається збільшення зносостійкості на 30% металу, що був наплавлений в суміші 0.07%  $\text{SiO}_2$  та флюсу, що вказує на перспективу з введенням наноконпонентів у суміші з флюсом.

При наплавленні дротом Нп-30ХГСА структура металу

що голчатий ферит поєднує високі міцнісні і в'язкі властивості і, таким чином, сприяє підвищенню зносостійкості. Введення у розплав ванни вуглецевмісного матеріалу

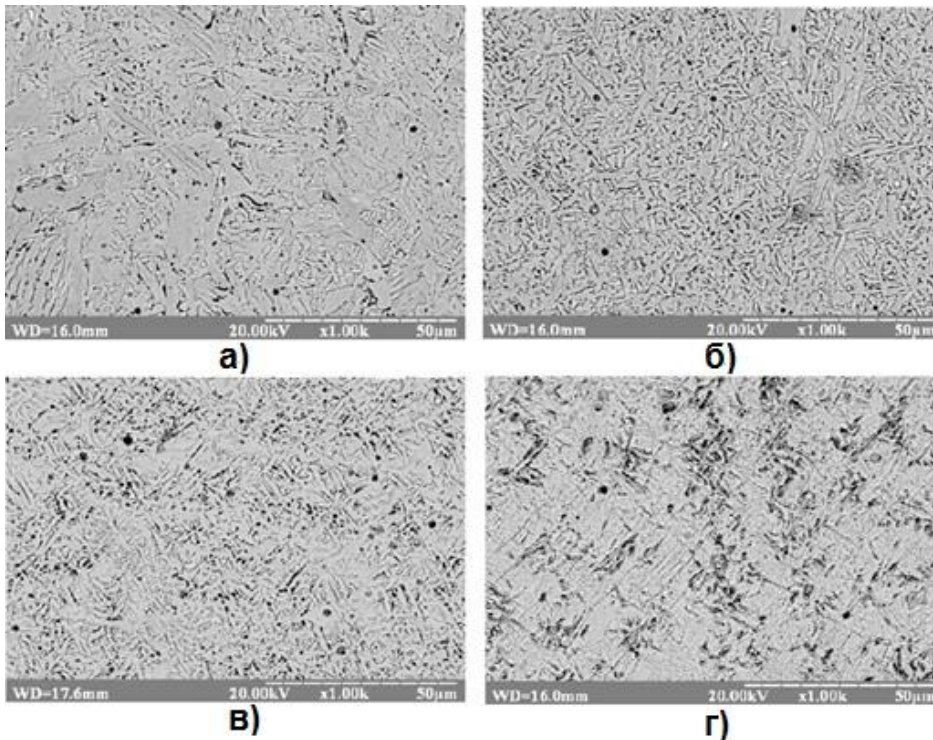


Рис. 9. Структури наплавленого металу дротом Нп-30ХГСА: а–у вихідному стані; б – при введенні 0.07 % SiO<sub>2</sub>; в – при введенні суміші Fe+0.04% SiO<sub>2</sub>; г– при введенні 0.94% вуглеволокна.

формує мартенситну структуру з карбідними виділеннями, що і приводить до підвищеної зносостійкості (Рис.9, г).

Вимірювання мікротвердості показали, що при середньому значенні металу вихідного валика 195 HV, мікротвердості металу у решті випадків вища (0.07% SiO<sub>2</sub> – 208 HV, 0.04% SiO<sub>2</sub>) – 222 HV, 0.43% вуглецевого волокна – 462 HV, 0.94% вуглецевого волокна – 522 HV).

У четвертому розділі для оцінки ролі неметалевих включень на формування структури металу валиків було досліджено 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, що може свідчити про можливу роль включення як зародка.

Аналіз розподілу неметалевих включень у валику середньовуглецевої низьколегованої композиції наплавленої самозахисним дротом свідчить про вплив наноконпонентів на кількість неметалевих включень та їх розмір. Зокрема при наплавленні дротом 25ХГ2С без нанодобавок їх об'ємна частка становить – 0.25% і доводиться, основному, на розмірний діапазон 0.07-0.49 мкм., з яких від 12% до 16% включень відповідають розмірного діапазону 0.13-0.37 мкм. У металі валика з 0.63% SiO<sub>2</sub> об'ємна частка неметалічних включень становить – 0.2%, з яких від 4% до 12% включень відповідають розмірного діапазону 0.07-0.85 мкм. Факт укрупнення неметалічних включень в цьому випадку може бути пов'язаний з підвищеною концентрацією наночастинок аеросилу, що сприяє їх коагуляції і коалесценції з неметалевими включеннями матеріалу під час кристалізації зварювальної ванни.

Порівняльний аналіз розподілу неметалевих включень у валику середньовуглецевої низьколегованої композиції при наплавленні під шаром флюсу дротом 30ХГСА вказує на збільшення об'ємної частки включень при наявності діоксиду

кремнію і на значно менший їх розмірний діапазон порівняно з металом вихідного валику. Встановлені закономірності підтверджуються результатами обробки розмірів включень тільки сферичної форми за показником діаметру рівнозначного кола (Рис. 10).

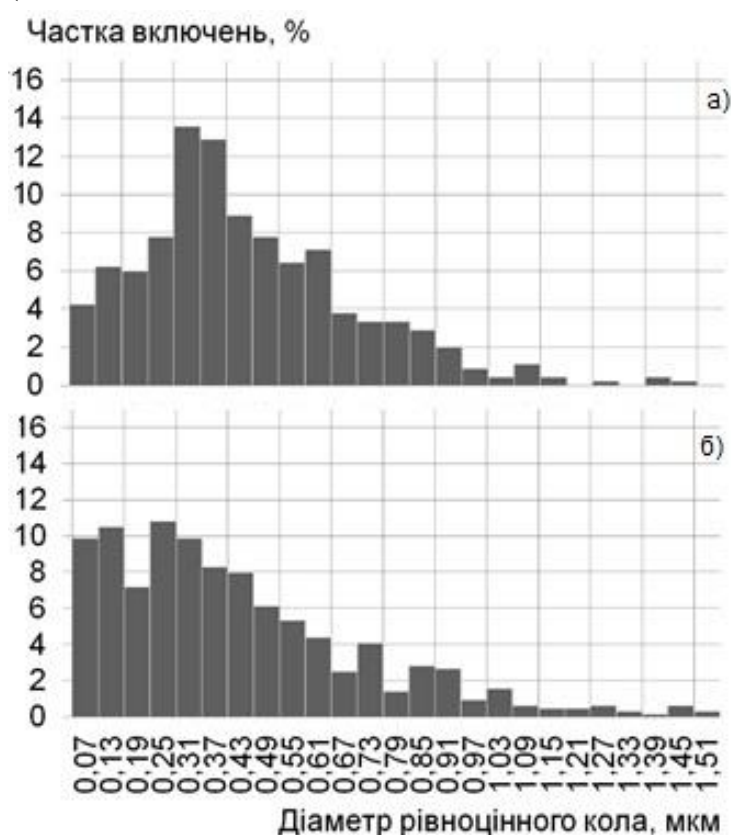


Рис. 10. Розподіл неметалевих включень металу наплавленого дротом Нп-30ХГСА:

а – у вихідному стані; б – при введенні 0.07% SiO<sub>2</sub>

У вихідному стані їх об'ємна частка становить 0.31% 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. Об'ємна частка включень суттєво збільшується при застосуванні тільки нанопорошку діоксиду кремнію (0.07%) і становить у металі валику 0.56%, з яких від 4 до 10% приходить на розмірний діапазон 0.07 – 0.61 мкм.

Незалежно від системи легування наплавленого металу введення нанопорошків оксидів змінює картину розподілення неметалевих включень як за їх вмістом у наплавленому металі, так і розподіленням за розмірами. Але спостерігаються відмінності за об'ємною часткою і розмірним діапазоном у випадку введення нанопорошку оксиду кремнію.

Так, у середньовуглецевій низьколегованій композиції наплавленій під шаром флюсу основна частка

включень приходить на менший розмірний діапазон порівняно з середньовуглецевою низьколегованою композицією наплавленою самозахисним дротом.

Сканування включень вказує на наявність у їх складі сульфідів марганцю, та різноманітних складних оксидів (кремнію, алюмінію, марганцю). З додаванням наноконпонентів змінюється і склад включень. Зустрічаються включення, що мають два піки по елементам, які свідчать про складну будову включення, що містить одночасно сульфід марганцю та різноманітні оксиди. При введенні вуглеволокна зустрічаються включення графіту.

Аналіз потрійних діаграм Al–O–Si, Al–O–Ti, Al–Si–Ti, TiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>, MnO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> підтверджує зміни кількості того чи іншого елемента та сполук у включеннях, що містяться в наплавленому валику.

Так, великий вміст кисню у включеннях свідчить про наявність значної кількості оксидів. А введення наноконпонентів призводить до збільшення кількості кремнію, алюмінію та титану.

Аналіз потрійних систем з оксидами свідчать про збільшення кількості оксидів алюмінію та марганцю в металі з наноконпонентами порівняно з металом у вихідному стані, що корелюється і з даними сканування частинок (Рис. 11). Зокрема,

якщо в металі у вихідному стані кількість часток з  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не перевищує 40%, то при введенні суміші  $\text{Fe}+0.04 \text{SiO}_2$  кількість часток збільшується до 50%, а окремі частки мають до 80% оксиду алюмінію. Кількість часток з  $\text{SiO}_2$  у вихідному стані становить до 60%, а метал з введеними наноконпонентами містить лише 50% таких часток.

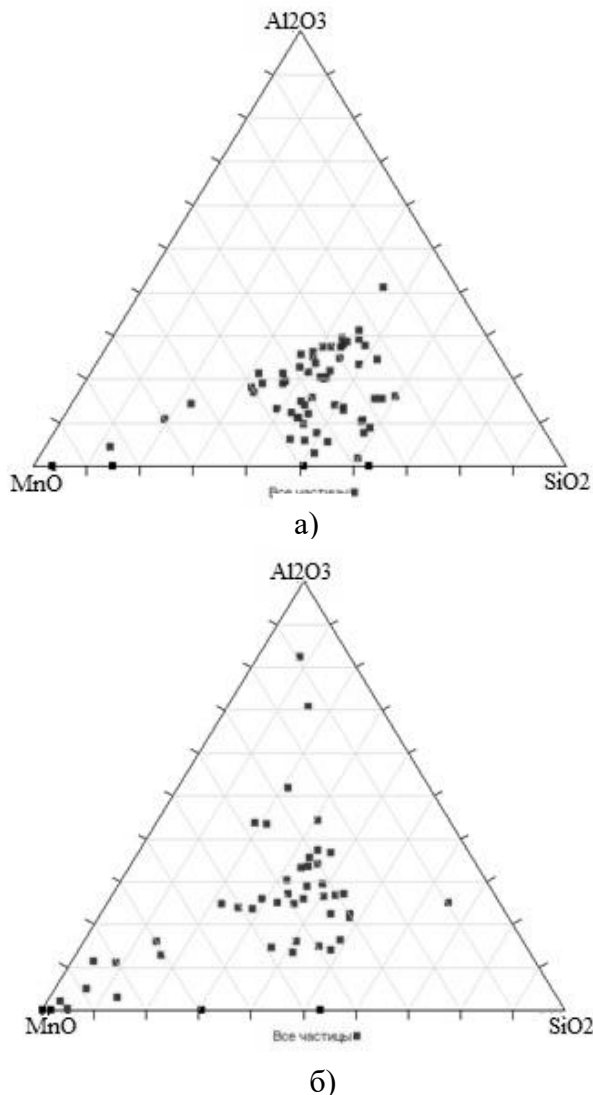


Рис. 11. Потрійні діаграми системи  $\text{MnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ : а – у вихідному стані; б – при введенні суміші  $\text{Fe}+0.043 \text{SiO}_2$

ється значно більша кількість включень, розташованих переважно по границях феритної фази. Структура являє собою суміш полігонального і переважно голчатого фериту, утворенню якого сприяє наявність на границях зерен включень.

Введення у розплав ванни вуглецевмісного матеріалу формує мартенситну структуру з карбідними виділеннями переважно по границях зерен.

При наплавленні середньовуглецевої високолегованої композиції типу 40X13 при введенні до зварювальної ванни нанопорошкових матеріалів виділення включень спостерігається, як у феритній матриці, так і у мартенситних пластинах. По межах зерен присутні ланцюжки неметалевих включень.

Певні припущення про механізми дії нанопорошків оксидів на формування структури можна зробити по результатах аналізу теплофізичних характеристик за даними диференціальної скануючої калометрії (ДСК) металу зварних швів низько-

Зміни за складом і морфологією включень є результатом змін умов кристалізації зварювальної ванни, при яких введення нанопорошкових матеріалів може сприяти формуванню додаткових центрів зародкоутворення і, відповідно, впливати на структурний стан наплавленого металу, сприяючи таким чином збільшенню зносостійкості наплавленого металу.

Як зазначалося раніше, внесення наноконпонентів позитивно впливає на зносостійкість і структурні перетворення в металі. У певній мірі це пов'язано і з роллю включень.

Так, наприклад, у випадку наплавлення середньовуглецевої низьколегованої композиції типу 30ХГСА включення, в основному, розташовані в середині зерен полігонального фериту і отже не відіграють роль додаткових зародків.

При введення 0.07% оксиду кремнію структура відрізняється малою кількістю зерен полігонального фериту і значною голчатістю. Включення менших розмірів порівняно з включеннями у структурі металу вихідного стану переважно локалізовані по границях феритної фази, що при розпаду аустеніту сприяє утворенню голчатого фериту.

При введенні нанопорошку  $\text{SiO}_2$  у суміші з Fe (0.04 мас. %  $\text{SiO}_2$ ) також спостеріга-

легованої високоміцної сталі 18ГСХНФ при зварюванні дротом Св-09Г2С і введенні нанопорошків оксидів через спечену лігатуру (табл. 1).

Загальною закономірністю є деяке зниження температур плавлення металу швів при введенні наноконпонентів. Відомо, що наноструктуровані матеріали відрізняються істотно більш низькою температурою плавлення, отже, деяке зниження температур ліквідусу може бути пов'язано з наявністю наночасток в металі швів.

Таблиця 1 – Теплофізичні характеристики металу швів

Сплав	ТЛ, °С	ТС, °С	ΔТ, °С
Вихідний метал	1543,4	1499,5	43,9
TiO <sub>2</sub> –0.04%	1535,8	1524	11,8
TiO <sub>2</sub> –0.07%	1540,6	1527,7	12,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 0.04%	1541,9	1518,6	23,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –0.08%	1522,5	1499	23,5

ТС – температура солідус, ТЛ – температура ліквідус, ΔТ – інтервал кристалізації

Зниження температури плавлення проявляється по різному для оксидів титану і алюмінію. Так, при температурі плавлення вихідного металу  $T = 1543,4^{\circ}\text{C}$  її зниження до  $T = 1535,8^{\circ}\text{C}$  спостерігається при введенні 0.04% TiO<sub>2</sub> і більшою мірою до  $T = 1522,5^{\circ}\text{C}$  при 0.08% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. У той же час, за винятком 0.08% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>%, спостерігається підвищення температур кристалізації металу швів, модифікованих нанопорошками оксидів.

При цьому, загальною закономірністю є, незалежно від дослідженого діапазону змін об'ємної частки введених нанопорошків оксидів, зменшення інтервалу кристалізації металу, модифікованого наноконпонентами. Так, якщо для вихідного металу він становить  $T = 43,9^{\circ}\text{C}$ , то спостерігається зменшення для дослідженого діапазону змін кожного з нанопорошків практично однаково і для оксиду алюмінію складає  $T = 23,3^{\circ}\text{C}$ , для оксиду титану  $T = 11,8^{\circ}\text{C}$ .

Звідси можна зробити висновок, що дія наноконпонентів проявляється вже на стадії кристалізації, змінюючи її умови в бік більш прискореного проходження, можливо, як наслідок появи на включеннях додаткових центрів зародкоутворення, тобто їх дії як модифікаторів 2-го роду. Їх роль може також проявлятися як модифікаторів 3-го роду (інокуляторів), які перебуваючи в розплаві і відбираючи тепло на власний нагрів і розплавлення знижують температуру розплаву, що призводить до зростання швидкості кристалізації. Їх роль, як встановлено в роботах ІЕЗ ім. Є.О. Патона, може також проявлятися і на етапі вторинної кристалізації, впливаючи на стійкість аустеніту до перетворення.

Для прогнозування зміни вмісту наноконпонентів у ванні, а відтак у наплавленому металі, було проведено розрахунки масових часток наноконпонентів у ванні для різних умов наплавлення. За основу розрахунків були взяті режимні параметри, що використовувались при експериментах, та параметри, що найчастіше використовуються при наплавленні. За результатами розрахунків було розроблено номограму, яка дозволяє для різних умов наплавлення обирати потрібні значення масових часток наноконпонентів.

У результаті досліджень модифікованих наплавлених шарів було зроблено висновок про їх високу зносостійкість, зокрема в умовах тертя металу по металу. Ре-

зультати роботи були опробуванні в трамвайному депо імені Т.Г. Шевченка м. Києва, при відновленні трамвайних коліс. Наплавлення проводилось дротом Св-08Г2С під шаром флюсу АН-348. В якості модифікатора використовувався нанопорошок  $\text{SiO}_2$ . Наплавлення здійснювалось на стандартних режимах, які застосовуються в депо.

Як показали механічні випробування метал модифікований таким чином, за 150 хв тертя показав в два рази більшу зносостійкість (втрати в масі становили 0.228г проти 0.118 г). Твердість наплавленого метала складала 160 *HV* у вихідному стані, та 200 *HV* металу з нанопорошком  $\text{SiO}_2$ .

За результатами проведених випробувань було розроблено рекомендації щодо концентрацій наноконпонентів для різних умов наплавлення при внесенні їх за різними схемами.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблені схеми введення наноконпонентів до зварювальної ванни, що пристосовані для умов наплавлення і які відрізняються за формою і способом введення, зокрема, у вигляді попередньо виготовлених спечених стрижнів, у вигляді сумішей нанопорошків оксидів із залізним порошком і безпосередньо тільки нанопорошків, скріплених ґрунтовкою або покритих шаром флюсу. На способи введення наноконпонентів до зварювальної ванни одержано Патенти України (Патенти України на корисну модель № 98985, № 105188).

2. При наплавленні високохромистих композицій з підвищеним вмістом вуглецю підтверджено позитивний вплив на зносостійкість металу модифікованого нанопорошками оксидів алюмінію та титану, при яких зносостійкість збільшується у 3,2 рази для наноконпонентів внесених за допомогою спеченої лігатури, та у 2 рази для металу, наноконпоненти до якого вносились в суміші з ґрунтовкою. Також встановлено, що більш ефективним є діоксид кремнію, збільшуючи зносостійкість більш ніж у 3 рази.

3. Встановлено що при наплавленні середньовуглецевої низьколегованої композиції під флюсом вихідна структура являє собою ферито-цементитну суміш переважно внутризереного фериту незначної дисперсності з включеннями, які розташовані в середині зерен полігонального фериту. Введення нанопорошку  $\text{SiO}_2$  приводить до значно більшої кількості включень, розташованих як у тілі, так і по границях феритної фази, і формуванню структур із суміші полігонального і, переважно, голчастого фериту, який поєднує міцнісні і в'язкі властивості, і сприяє, таким чином, підвищенню зносостійкості. Введення вуглецевовмісного матеріалу супроводжується зміною вихідної ферито-цементитної суміші на мартенсит з карбідними виділеннями і відповідно підвищенням зносостійкості у 4 рази.

4. Показано, що при наплавленні самозахисним дротом середньовуглецевої низьколегованої композиції метал вихідного валика має бейнітну структуру з незначною кількістю мартенситної складової, а неметалеві включення розташовані як у бейнітній, так і мартенситній складових структури. При введенні нанопорошку  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і нанопорошку  $\text{TiO}_2$  спостерігається подрібнення мартенситної і бейнітної складових структури, а при введенні нанопорошку  $\text{SiO}_2$  формується мартенситна структура. Також встановлено, що діоксид кремнію більш ефективний по відношенню до нанопорошків  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та  $\text{TiO}_2$ , забезпечуючи підвищення зносостійкості більш



ніж у 4 рази, що пов'язано зі зміною бейнітної структури на чисто мартенситну, що і визначає підвищення зносостійкості.

5. Встановлено, що при наплавленні середньовуглецевої низьколегованої композиції розподіл неметалевих включень за розміром поділяється на три групи: включення розмірами до 0.3 мкм, від 0.3 до 0.8 мкм і більше 0.8 мкм. Показано, що у вихідному стані їх об'ємна частка становить 0.31% і відповідає, в основному, розмірному діапазону 0.07 – 0.85 мкм, а при введенні у зварювальну ванну нанопорошку діоксиду кремнію об'ємна частка включень збільшується до 0.56% і приходиться на дещо менший розмірний діапазон 0.07 – 0.61 мкм.

6. За результатами аналізу розподілення, складу та морфології включень показано, що більш ефективний прояв нанопорошку оксиду кремнію пов'язано також зі збільшенням кількості неметалевих включень у наплавленому металі майже у 2 рази, при цьому, на відміну від нанопорошків оксидів алюмінію і титану, формуються не тільки алюмосілікати марганцю, а і включення з оксидів алюмінію, що приводить до збільшення твердих складових структури і, відповідно, зносостійкості.

7. Показано, що при зміні погонної енергії від  $0.8 \times 10^6$  до  $1.7 \times 10^6$  Дж/м вміст наноконцентів у ванні, а відтак у наплавленому валику, зменшується вдвічі, відповідно до цього розроблені номограми, за якими визначається необхідна масова частка наноконцентів при змінах умов наплавлення.

8. Розроблені технологічні рекомендації, які враховують специфіку введення наноконцентів до зварювальної ванни і особливості технологій наплавлення. За результатами промислового випробування при відновленні поверхонь трамвайних коліс показано, що при реалізації запропонованої технології твердість наплавленого валика збільшується зі 160 HV до 200 HV, а зносостійкість збільшується у два рази.

### **Наукові праці, в яких опубліковані результати дисертації**

1. Кузнецов В.Д. Порівняльна оцінка зносостійкості поверхневих шарів різного складу в умовах тертя без мащення та абразивного зношування / В.Д. Кузнецов, В.М. Пащенко, І.В. Смирнов, Д.В. Степанов // Науково-технічний журнал Проблеми тертя та зношування. Київ НАУ 2014 №2(63); с. 85-91. Журнал включений до міжнародних науково-метричних баз EBSCO, Google Scholar, WorldCat, РІНЦ.

*Здобувачем проведено випробування на зносостійкість в умовах сухого тертя металу по металу та виробування на стійкість в умовах абразивного зношування.*

2. Кузнецов В.Д. Вплив наноксиду кремнію та вуглевісного матеріалу на зносостійкість наплавленого металу / В.Д. Кузнецов, Д.В. Степанов, В.М. Пащенко, В.В. Перемітько // Науково-технічний журнал Проблеми тертя та зношування. Київ НАУ 2015 №3 (68); с. 31-38. Журнал включений до міжнародних науково-метричних баз EBSCO, Google Scholar, WorldCat, РІНЦ.

*Здобувачем проведено випробування на зносостійкість наплавленого металу з введенням наноконцентів та проведено аналіз розподілу неметалевих включень у металі валику, при наплавленні середньолегованим матеріалом під шаром флюсу.*

3. Кузнецов В.Д. Износостойкость наплавленного металла типа углеродистых и хромомарганцевых сталей в условиях сухого трения скольжения металла по металлу. В.Д. Кузнецов, Д.В. Степанов, В.А. Маковой, Я.П. Черняк // Автоматическая сварка №6, 2013 г. - с. 44-47. Фахове видання.

*Здобувачем запропоновано методику проведення випробувань на зносостійкість в умовах сухого тертя металу по металу.*

4. Кузнецов В. Д. Вплив модифікування наночастинками оксидів на структуроутворення зварних швів низьколегованих сталей / В.Д. Кузнецов, І.В. Смирнов, Д.В. Степанов, К.П. Шаповалов // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк. – 2013. – Випуск № 41 Ч. 2. – С. 61-68. Фахове видання.

*Здобувачем проведено зварювальні роботи, запропоновано схему введення до зварювальної ванни спеченої лігатури, що містить наноконпоненти.*

5. 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. Фахове видання.

*Здобувачем проведено випробування на зносостійкість наплавленого металу з введенням наноконпонентів та проведено аналіз розподілу неметалевих включень у металі валику, при наплавленні високолегованим матеріалом, середньолегованим самозахисним матеріалом та високохромистим чавуном.*

6. Кузнецов В.Д. Структура и свойства металла сварного шва, модифицированного наноксидами / В.Д. Кузнецов, Д.В. Степанов // Автоматическая сварка - 2015 №11. - С. 19-24. Фахове видання.

*Здобувачем проведено аналіз розподілу оксидів у включеннях та проаналізовано теплофізичні характеристики шва металу.*

7. Патент на корисну модель № 98985 UA, МПК (2006.01) В 23К 9/16. Спосіб електродугового зварювання з введенням у зварювальну ванну наноконпонентів / В.Д. Кузнецов, П.І. Лобода, С.К. Фомічов, І.В. Смирнов, Д.В. Степанов. – № у 2014 13486; заявл. 15.12.14; опубл. 12.05.15. Бюл. №9.

*Здобувачем було проведено вибір умов зварювання та проведено дослідні випробування.*

8. Патент на корисну модель № 105188 UA, МПК (2006.01) В 23К 9/16. Спосіб електродугового зварювання та наплавлення з введенням у зварювальну ванну наноконпонентів / В.Д. Кузнецов, Д.В. Степанов. – № у 2015 08024; заявл. 12.08.15; опубл. 10.03.16. Бюл. №5.

*Здобувачем було проведено вибір умов зварювання та проведення дослідних випробувань.*

9. Степанов Д.В. Зносостійкість наплавлених вуглецевих та аустенітних матеріалів при терті металу по металу / Д.В. Степанов, В.Д. Кузнецов, В.А. Маковей, Я.П. Черняк – VII Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов "Сварка и родственные технологии" – м. Ворзель, 2013.

*Здобувачем запропоновано методику проведення випробувань на зносостійкість в умовах сухого тертя металу по металу.*

10. Воронежський І.А. Вплив наноксидів титану на розподілення, склад та вміст неметалевих включень у металі шва / І.А. Воронежський, Р.С. Фенюк, О.О. Ярмоленко, Д.В. Степанов – Сьома всеукраїнська міжгалузєва науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників "Зварювання та споріднені процеси і технології" – м. Київ, 2014.

*Здобувачем проведено аналіз розподілення, складу та вмісту неметалевих включень у наплавленому металі при введенні до зварювальної ванни нанопорошку оксиду титану.*

11. Воронезський І.А. Вплив наноксидів алюмінію на розподілення, склад та вміст неметалевих включень у металі шва / І.А. Воронезський, Р.С. Фенюк, О.О. Ярмоленко, Р.І. Шаргородський, Д.В. Степанов – Інженерія поверхні. Комплексний підхід. Перша всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, спірантів та наукових співробітників – м. Київ, 2014.

*Здобувачем проведено аналіз розподілення, складу та вмісту неметалевих включень у наплавленому металі при введенні до зварювальної ванни нанопорошку оксиду алюмінію.*

12. Воронезський І.А. Спосіб електродугового зварювання з введенням у зварювальну ванну наноконпонентів / І.А. Воронезський, Д.В. Степанов – Восьма всеукраїнська міжгалузєва науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників „Зварювання та споріднені процеси і технології” – м. Київ, 2015.

*Здобувачем було проведено вибір умов зварювання та проведено дослідні випробування.*

13. Степанов Д.В. Модифікування зносостійкого наплавленого металу наночастинками оксидів алюмінію / Д.В. Степанов, І.А. Воронезський – Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій. Всеукраїнська науково-технічна конференція присвячена 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. адм. Макарова – м. Миколаїв, 2014.

*Здобувачем проведено дослідження зносостійкості наплавленого металу та структурних змін при введенні до зварювальної ванни нанопорошку оксиду алюмінію.*

14. Федоськін М.В. Вплив наноксидів на зносостійкість наплавленого металу дротом ПП-Нп40Х13 / М.В. Федоськін, Б.Д. Соломаха, Д.В. Степанов – II Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників "Інженерія поверхні. Комплексний підхід" – м. Київ, 2015.

*Здобувачем проведено дослідження зносостійкості наплавленого металу та структурних змін наплавленого металу дротом ПП-Нп40Х13 при введенні до зварювальної ванни наноконпонентів скріплених ґрунтовкою.*

15. Штанько С.В. Вплив наноксидів на зносостійкість наплавленого металу дротом 25ХГ2С / С.В. Штанько, Б.Д. Соломаха, Д.В. Степанов – II Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників "Інженерія поверхні. Комплексний підхід" – м. Київ, 2015.

*Здобувачем проведено дослідження зносостійкості наплавленого металу та структурних змін наплавленого металу дротом 25ХГ2С при введенні до зварювальної ванни наноконпонентів.*

16. Федоськін М.В. Вплив наноксидів на зносостійкість наплавленого металу в умовах сухого тертя металу по металу / М.В. Федоськін, Д.В. Степанов, Ю.П. Бородій – Досконалість зварювання - комплексний підхід. IX Всеукраїнська науково-технічна конференція – м. Київ, 2015.

*Здобувачем проведено дослідження зносостійкості наплавленого металу та структурних змін наплавленого металу дротом ПП-Нп40Х13 при введенні до зварювальної ванни наноконпонентів у вигляді спеченої лігатури.*

17. Штанько С.В. Вплив наноксидів на зносостійкість наплавленого металу в умовах абразивного зношування / С.В. Штанько, Д.В. Степанов – Досконалість зва-

рювання - комплексний підхід. IX Всеукраїнська науково-технічна конференція – м. Київ, 2015.

*Здобувачем проведено дослідження зносостійкості наплавленого металу та структурних змін наплавленого металу дротом Ан-180 при введенні до зварювальної ванни наноконпонентів.*

## АНОТАЦІЯ

**Степанов Д.В.** «Дугове наплавлення зносостійкого металу із застосуванням нанопорошків оксидів». – Рукопис.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена пошуку шляхів збільшення зносостійкості та ресурсу роботи виробів, що працюють в умовах тертя металу по металу та абразивного зношування.

Розроблені схеми введення наноконпонентів до зварювальної ванни, що пристосовані для умов наплавлення і які відрізняються за формою і способом введення, зокрема, у вигляді попередньо виготовлених спечених стрижнів, у вигляді сумішей нанопорошків оксидів із залізним порошком і безпосередньо тільки нанопорошків.

Розроблені раціональні режими механохімічної обробки для отримання гомогенної порошкової суміші із нано- та мікрочастинок за допомогою планетарного кульового млину з додатковим вакуумуванням робочих ємностей.

Підтверджено при наплавленні високохромистих композицій з підвищеним вмістом вуглецю позитивний вплив на зносостійкість об'ємних співвідношень нанопорошків оксидів алюмінію та титану, при яких зносостійкість збільшується у 2 рази, але стосовно до цих композицій більш ефективним є діоксид кремнію, збільшенням зносостійкості у 3 рази.

При наплавленні середньолегованих композицій встановлено, що діоксид кремнію більш ефективний по відношенню до нанопорошків оксидів алюмінію та титану, забезпечуючи підвищення зносостійкості більш ніж в 4 рази.

Встановлено, що при наплавленні високолегованої композиції введення до зварювальної ванни нанопорошкових матеріалів приводить до збільшення кількості неметалевих включень у структурі наплавленого металу і формуванню ланцюжків включень по межах зерен.

За результатами аналізу морфології та хімічного складу включень для умов наплавлення середньолегованої композиції встановлено, що у вихідному стані ядро включення містить, в основному, алюмосилікат марганцю, а при введенні діоксиду кремнію поряд з ними присутні і включення оксиду алюмінію (корунду), що при збільшенні їх об'ємної частки, як більш твердих складових структури, і пояснює більш ефективний вплив нанопорошку оксиду кремнію на зносостійкість наплавленого металу.

Розроблені технологічні рекомендації, які враховують специфіку введення наноконпонентів до зварювальної ванни і особливості технологій наплавлення.

**Ключові слова:** дугове наплавлення, зносостійкість, наноконпоненти, нанопорошки, структура, неметалеві включення, морфологія включень.

## АННОТАЦИЯ

**Степанов Д.В.** «Дуговая наплавка износостойкого металла с применением нанопорошков оксидов». - Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 - «Сварка родственные процессы и технологии» - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» Министерства образования и науки Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена поиску путей увеличения износостойкости и ресурса работы изделий, работающих в условиях трения металла по металлу и абразивного износа.

Разработаны схемы введения нанокomпонентов в сварочную ванну, приспособленные для условий наплавки и которые отличаются по форме и способу введения, в частности, в виде предварительно изготовленных спеченных стержней в виде смесей нанопорошков оксидов с железным порошком и непосредственно только нанопорошков. Скреплены предварительно грунтовкой смеси или только нанопорошки наносятся на пластину тонким слоем на ширину валика по длине наплавки.

Разработаны рациональные режимы механохимической обработки для получения гомогенной порошковой смеси с нано- и микрочастиц с помощью планетарной шаровой мельницы с дополнительным вакуумированием рабочих емкостей.

Подтверждено при наплавке высокохромистых композиций с повышенным содержанием углерода положительное влияние на износостойкость объемных соотношений нанопорошков оксидов алюминия и титана, при которых износостойкость увеличивается в 2 раза, но применительно к этим композициям более эффективен диоксид кремния. Увеличение износостойкости более чем в 3 раза в этом случае может быть связано с формированием мартенситной структуры, как более твердой по отношению к бейнитно-мартенситной.

При наплавке среднелегированных композиций установлено, что диоксид кремния более эффективен по отношению к нанопорошкам  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$ , обеспечивая повышение износостойкости более чем в 4 раза, что связано с изменением бейнитной структуры на чисто мартенситную, что и определяет повышение износостойкости.

Установлено, что при наплавке высоколегированной композиции введение в сварочную ванну нанопорошковых материалов приводит к увеличению количества неметаллических включений в структуре наплавленного металла и формированию цепочек включений по границам зерен.

Установлено, что при наплавке среднелегированной композиции распределение неметаллических включений по размеру делится на три группы: включение размерами до 0.3 мкм, от 0.3 до 0.8 мкм и более 0.8 мкм. Показано, что в исходном состоянии их объемная доля составляет 0.31% и соответствует, в основном, соразмерном диапазона 0.07 - 0.85 мкм. и существенно увеличивается при введении в сварочную ванну нано порошка диоксида кремния и составляет в металле валике 0.56%, с несколько меньшим размерным диапазоном (0.07 - 0.61 мкм.)

По результатам анализа морфологии и химического состава включений для условий наплавки среднелегированной композиции установлено, что в исходном состоянии ядро включения содержит, в основном, алюмосиликат марганца, а при введении диоксида кремния рядом с ними находятся и включения оксида алюминия

(корунда), что при увеличении их объемной доли, как более твердых составляющих структуры, и объясняет более эффективное воздействие нанопорошков оксидов кремния на износостойкость наплавленного металла.

Разработаны технологические рекомендации, учитывающие специфику введение нанокomпонентов в сварочную ванну и особенности технологий наплавки.

**Ключевые слова:** дуговая наплавка, износостойкость, нанокomпоненты, нанопорошки, структура, неметаллические включения, морфология включений.

## ABSTRACT

**Stepanov D.V.** "Arc welding wear-resistant metal using oxide nanopowders." - Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.03.06 - "Welding and Related Processes and Technologies" - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to finding ways to increase the wear resistance and service life of the products, working in conditions of friction of metal on metal and abrasive wear.

Developed rational modes mechanochemical processing to obtain homogeneous powder mixtures of nanoparticles and microparticles using a planetary ball mill with an additional evacuation working capacities.

Confirmed positive effect on wear resistance volume ratio of aluminum and titanium nanopowders oxides in weld surfacing high chromium compositions with a high content of carbon in which wear resistance is increased by 2 times, but in relation to these compositions more effective is silica dioxide increasing wear resistance by 3 times.

It was established that in weld surfacing medium alloyed composition distribution of nonmetallic inclusions in size is divided into three groups, including the size of 0.3 microns, from 0.3 to 0.8 microns and more than 0.8 microns.

The analysis of the morphology and chemical composition of inclusions for conditions of weld surfacing medium alloyed composition shows that in the initial state the core of inclusion contains mainly aluminum silicate manganese but providing of silica dioxide near with it form the inclusion of aluminum oxide (corundum) that in increase of volume fraction is as a solid structure component and this explains more effective influence of nanopowders silicon oxide on wear resistance of weld metal.

The technological recommendations that take into account the specific input of nanocomponents into the weld pool and the features of weld surfacing technologies are developed.

**Keywords:** arc weld surfacing, wear resistance, nanocomponents, nanopowders, structure, non-metallic inclusion.