

**Підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей і конструкцій нанесенням модифікованих наноутвореннями покриттів**

**Повышение эксплуатационных свойств поверхностей деталей и конструкций нанесением модифицированных нанообразованиями покрытий**

**Increasing of working properties of the industrial components surfaces by applying modified nano-formation coatings**

**1. Номер державної реєстрації НДР 0114U003428**

**2. Науковий керівник - д.т.н., проф. Кузнецов В.Д., Кузнецов В.Д., Kuznetsov V.D.**

**3. Суть розробки, основні результати.**

**(укр.)**

Підвищення експлуатаційних властивостей, зокрема зносостійкості поверхонь деталей і конструкцій досягається модифікацією поверхневих шарів наноутвореннями шляхом введення нанопорошків у зварювальну ванну при електродуговому наплавленні та у покриття при газотермічному напиленні.

Основу наплавлених і напилених поверхневих шарів складали матеріали з різними системами легування, які рекомендовані для умов абразивного зношування та сухого тертя металу по металу. Як модифікатори застосовували нанопорошки оксиду алюмінію, діоксиду титану, діоксиду кремнію фракцією 5–50 нм, додавання яких у незначній кількості дозволяє суттєво впливати на структуроутворення та фізико-механічні властивості матеріалу покриття. Введення наночастинок у зварювальну ванну та покриття здійснюється за спеціальними схемами, що призводить до зміни умов кристалізації і формування дрібнозернистої мікроструктури з певним відсотком твердої складової, яка відповідає за показники міцності та зносостійкості поверхневих шарів.

Встановлено взаємозв'язок між структурним і фазовим складом та властивостями модифікованих поверхневих шарів в залежності від вмісту та типу нанопорошків. Введення нанопорошку діоксиду кремнію сприяє формуванню голчатого фериту, як структурної складової підвищеної міцності і в'язкості та утворенню неметалевих включень переважно оксидного типу, що приводить до збільшення зносостійкості наплавленого валика у 3–4 рази. При наплавці низьколегованих сталей встановлено позитивний вплив добавок нанопорошку оксиду алюмінію на зносостійкість в умовах абразивного зношування, зі збільшенням даного показника більш ніж у 6 разів.

Розроблені раціональні режими механохімічного синтезу для створення порошкової суміші із nano та мікрочастинок за допомогою планетарного кульового млину. Встановлені режими напилення отриманих порошкових сумішей з використанням ламінарного плазмового струменя, що сприяє переносу нанопорошків у покриття.

Визначений діапазон оптимальної кількості вмісту нанопорошків в межах 0,5–1,0 мас.%. Наявність наночастинок оксиду алюмінію в покритті у встановленої кількості сприяє підвищенню зносостійкості покриттів у 2,5–3 рази, зниженню коефіцієнту тертя та підвищенню твердості на 25–40%.

Розроблені технологічні рекомендації, щодо електродугового наплавлення та плазмового напилення модифікованих наноутвореннями покриттів.

**(рус.)**

Повышение эксплуатационных свойств, в частности износостойкости поверхностей деталей и конструкций достигается модификацией поверхностных слоев нанообразованиями путем введения нанопорошков в сварочную ванну при электродуговой наплавке и в покрытие при газотермическом напылении.

Основу наплавленных и напыленных поверхностных слоев составляли материалы с различными системами легирования, которые рекомендованы для условий абразивного износа и сухого трения металла по металлу. В качестве модификаторов применяли нанопорошки оксида алюминия, диоксида титана, диоксида кремния фракцией 5–50 нм, введение которых у незначительных количествах позволяет существенно влиять на структурообразование и физико-механические свойства материала покрытия. Введение наночастиц в сварочную ванну и покрытия осуществляется по специальным схемам, что приводит к изменению условий кристаллизации и формирования мелкозернистой микроструктуры с определенной долей твердой составляющей, отвечающей за показатели прочности и износостойкости поверхностных слоев.

Установлена взаимосвязь между структурным и фазовым составом и свойствами модифицированных поверхностных слоев в зависимости от содержания и типа нанопорошков. Введение нанопорошка диоксида кремния способствует формированию игольчатого феррита, как структурной составляющей повышенной прочности и вязкости и образованию неметаллических включений преимущественно оксидного типа, что приводит к повышению износостойкости наплавленного валика в 3–4 раза. При наплавке низколегированных сталей установлено положительное влияние добавок нанопорошка оксида алюминия на износостойкость в условиях абразивного износа, с увеличением данного показателя более чем в 6 раз.

Разработанные рациональные режимы механохимического синтеза для создания порошковой смеси из нано и микрочастиц с помощью планетарной шаровой мельницы. Установлены режимы напыления полученных порошковых смесей с использованием ламинарного плазменной струи, что способствует переносу нанопорошков в покрытие. Определен диапазон оптимального содержания нанопорошков в пределах 0,5–1,0 мас.%. Наличие наночастиц оксида алюминия в покрытии в установленном количестве способствует повышению износостойкости покрытий в 2,5–3 раза, снижению коэффициента трения и повышению твердости на 25–40%.

Разработаны технологические рекомендации по электродуговой наплавке и плазменному напылению модифицированных нанообразованиями покрытий.

**(англ.)**

Increasing of operational properties, especially wear-resistant surface of industrial components may be achieved by modifying the surface layers of nano forms through the providing of nanopowders into the molten pool at electric-arc surfacing and coating during thermal spraying.

The basis of the weld and the surface layers were deposited by materials with different doping systems, which are recommended for conditions of abrasion and the dry friction of metal on metal. As modifiers were used nanopowders of alumina, titania and silicon fraction of 5-50 nm, whose providing in small amounts can significantly affect the nucleation and physico-mechanical properties of the coating material. Providing of nanoparticles into the weld pool and the coating is carried out at special circuits, which leads to a change in the conditions of crystallization and the formation of a fine-grained microstructure with a certain amount of hardening constituents which is responsible for strength values and wear resistance of the surface layers.

The relationship between the structural and phase composition and properties of modified surface layers, depending on the content and type of nanopowder. Providing of nano-powder silicon dioxide contributes to the formation of acicular ferrite, a structural component of high strength and toughness, which has a positive effect on endurance and leads to the formation of nonmetallic inclusions predominantly oxide type increasing the wear resistance of the weld deposited metal in 3–4 times. When surfacing low alloy steels it is found a positive effect of aluminum oxide nanopowder additives on wear resistance under abrasive wear with an increase of it more than 6 times.

Rational modes mechanochemical synthesis to create a powder mixture of nano and microparticles using a planetary ball mill is developed. Modes set spraying powder mixtures are obtained using a laminar plasma jet, thereby transferring nanopowder coating. The range of

optimum content of nanopowders is within 0,5–1,0%. It is shown that the presence of aluminum oxide nanoparticles in the coating in an amount established by coating enhances the wear resistance 2,5–3 times and reduce the friction coefficient and improve the hardness by 25–40%.

The technological recommendations arc weld surfacing and plasma spray coatings modified nanostructures are presented.

#### **4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.**

– Пристрій для плакування порошоків у вакуумі [Текст]/ І.В. Смирнов, І.А. Селіверстов, А.В. Чорний, В.Ю. Ковальчук; Патент на корисну модель. – № 89851. – опубл. 25.04.2014 р., Бюл. №8.

– Спосіб електродугового зварювання з введенням у зварювальну ванну наноконпонентів [Текст]/ В.Д. Кузнецов, П.І. Лобода, С.К. Фомічов та інш. // Патент на корисну модель. – №98985. – опубл. 12.05.2015 р., Бюл. №9.

– Композиційний металокерамічний порошок для газотермічних покриттів [Текст]/ І.В. Смирнов, В.Д. Кузнецов, А.В. Чорний та інш. // Патент на корисну модель. – №99762. – опубл. 25.06.2015 р., Бюл. №12.

#### **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Розробка відповідає світовому рівню. Значення показників якості модифікованих наноутвореннями покриттів, а саме: твердості, зносостійкості, адгезійно-когезійної міцності відповідають найкращим аналогам, що виробляються провідними світовими фірмами.

#### **6. Економічна привабливість для просування на ринок**

Застосування розроблених технологій модифікування поверхневих шарів за допомогою нанопорошків дозволяє значно підвищити експлуатаційні властивості поверхонь деталей і конструкцій. Такий підхід виключає необхідність використання гостродефіцитних легуючих елементів та додаткових технологічних, як правило енергомістких заходів і вирішує проблему подовження ресурсу роботи деталей та конструкцій на базі недорогих і доступних існуючих вітчизняних матеріалів та обладнанні.

Конкурентоздатність та економічна привабливість запропонованих технологій полягає в досягнутих показниках експлуатаційних властивостей поверхневих шарів отриманих високоефективними методами електродугового наплавлення та плазмово-порошкового напилення, а саме:

- підвищення у 3–4 рази стійкості матеріалу наплавлених поверхневих шарів до абразивного спрацьовування;
- підвищенням зносостійкості плазмово-напиленних покриттів у 2,5–3 рази в умовах тертя ковзання;
- підвищення міцності зчеплення покриття з основою на 16–20%;
- зниження коефіцієнту тертя та підвищення твердості плазмово-напиленних покриттів на 25–40%.

#### **7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).**

Технології створення поверхневих модифікованих наноутвореннями покриттів із застосуванням нанопорошків оксидів алюмінію, кремнію та титану можуть застосовуватись на підприємствах та організаціях різних галузей промисловості: машинобудуванні, металургійному і гірничому комплексах, авіа і суднобудуванні, де широко розповсюджені технології інженерії поверхні і гостро стоїть проблема підвищення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей та конструкцій.

#### **8. Стан готовності розробки.**

Розроблені та виготовлені зразки з модифікованими наноутвореннями поверхневими шарами, відпрацьовані відповідні технічні заходи та режимні параметри, а також технологічні рекомендації щодо електродугового наплавлення та плазмового напилення модифікованих наноутвореннями покриттів.

Можлива розробка дослідно-промислових зразків нового устаткування для плазмово-порошкового наплавлення, які повністю адаптовані до існуючого основного силового обладнання і можуть бути впроваджені у промислове виробництво.

## 9. Існуючі результати впровадження

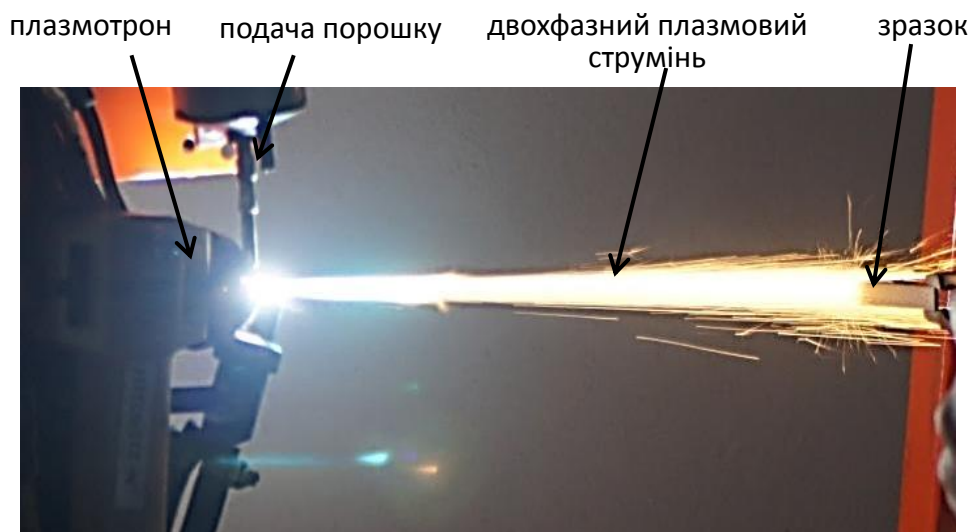
Натурні зразки виробів з модифікованими наноутвореннями наплавленими шарами апробовані у трамвайному депо ім. Т.Г. Шеченко, м. Київ. Встановлено, що в результаті модифікування поверхневих шарів нанопорошками оксидів кремнію відбувається підвищення твердості до НВ 240, що задовольняє умовам зміцнення відновлених трамвайних коліс. Оцінка зносостійкості може бути визначена за результатами експлуатаційної обкатки не менше ніж 40000 км.

Результати роботи впроваджено у навчальний процес при викладанні дисципліни «Технологія та обладнання для наплавлення» (підготовлений новий розділ «Електродугове наплавлення поверхневих шарів модифікованих наноутвореннями», виданий навчальний посібник «Технология и оборудование для наплавки» із грифом Міносвіти). Захищено 2 докторських дисертацій, підготовлена до захисту одна кандидатська дисертація, отримано 3 патенти, на 2 патенти отримано позитивне рішення, опубліковано 23 стаття у фахових журналах (у тому числі 13 у виданнях, що входять до наукометричних баз), опубліковано 4 доповіді у закордонних конференціях, 6 доповідей у збірниках докладів міжнародних конференцій та 15 тез доповідей на наукових конференціях республіканського рівня зі студентами; результати роботи використані під час написання та захисту 2 магістерських робіт та 2 дипломних проектів спеціалістів.

## 10. Назва організації, телефон, E-mail

НТУУ "КПІ", зварювальний факультет, кафедра інженерії поверхні, 406-82-42, [v.kuznetsov@kpi.ua](mailto:v.kuznetsov@kpi.ua)

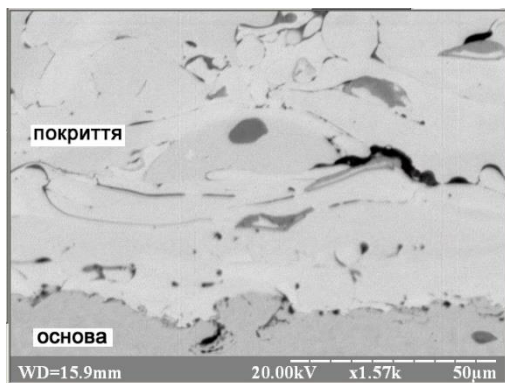
## 11. Фото розробки



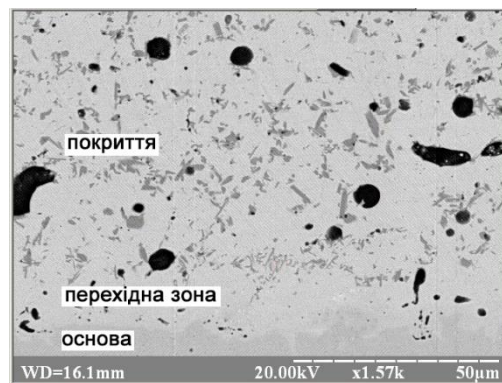
Загальний вид плазмово-порошкового наплення ламінарним плазмовим струменем

### Технічні характеристики плазмотрону

Робочий газ,	аргон
Робочий струм плазмотрона, А	80 - 100
Робоча напруга, В	30 - 50
Витрата плазموутворюючого газу, л/хв	2,0 - 4,0
Витрата захисного газу, л/хв	1,0 - 4,0
Продуктивність, кг/год	0,5 - 4
Коефіцієнт використання матеріалу	0,6 - 0,8



а)



б)

Мікроструктура плазмового покриття системи NiCrFeBSi модифікованого нанопорошком  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до (а) і після оплавлення (б)

## 12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки Навчальні посібники із грифом МОН:

1. Технология и оборудование для наплавки: учебное пособие: в 2-х ч. А.Ф. Власов, В.Д. Кузнецов и др. – Краматорск: ДГМА, 2014.–306с.

**Статті у фахових виданнях у т.ч. таких, що входять до наукометричних баз:**

1. Кузнецов В.Д. Вплив наноксидів алюмінію на розподілення неметалевих включень і структуру метала шва низьколегованих сталей [Текст]/В.Д. Кузнецов, І.В. Смирнов, К.П. Шаповалов//Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – №1.– С.102-106

2. Смирнов І.В. Підвищення корозійної стійкості плазмових покриттів на основі плакованого порошку оксиду алюмінію [Текст] /І.В. Смирнов// Науковий вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2014. – №1.– С.34-39.

3. Лобода П.І. Дослідження розподілу неметалевих включень в металі шва при модифікуванні нанодисперсним порошком оксиду алюмінію [Текст] / П.І. Лобода, В.Д.Кузнецов, І.В. Смирнов, М.О.Сисоєв, К.П. Шаповалов //Міжвузівський збірник наукових праць «Прогресивні технології і системи машинобудування». – Донецьк.–2014.–Випуск 1(47). – С174-182.

4. Кузнецов В.Д. Порівняльна оцінка зносостійкості поверхневих шарів різного складу в умовах сухого тертя та абразивного зношування [Текст] / В.Д.Кузнецов, В.М. Пашенко, І.В. Смирнов, Д.В. Степанов//Проблеми тертя та зношування.–2014.–№2.– С.85-91

5. Смирнов І. В. Застосування нано-порошків оксидів при зварюванні та плазмовому напиленні покриттів [Текст] / І. В. Смирнов, В.Д. Кузнецов, К.П.Шаповалов, А.В. Чорний //Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2014. – № 1 (32). – С.228-233.

6. Thiem P. APS gespritzte Beschichtungen aus Eisenaluminidpulvern unter thermischer und mechanischer Belastung [Текст] / P. Thiem, A. Chorny, I. Smirnov, M. Krüger, Th. Halle// 15. Sommerkurs Werkstoffe und Fügen am Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 12.-13. September 2014. – P. 157-164.

7. Смирнов І.В. Температурно-временные зависимости при плакировании и плазменном напылении порошков [Текст] /И.В. Смирнов, А.Ю.Андрейцев, А.В. Черный// Вестник ХНТУ.— 2014.— №3(50).— С.474-479.

8. Фомічов С.К. Мікроструктура та трибокорозійні властивості залізо – алюмінієвих плазмових покриттів [Текст] /С.К. Фомічов, І. В. Смирнов, А.В. Чорний //Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: в 2-х т./ Спецвипуск журналу “Фізико – хімічна механіка матеріалів” . – №10. Львів: Фізико – механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2014. –Т.1. – с.75-79.

9. Smirnov I.V. Improved adhesion strength, corrosion and wear performance of plasma-sprayed coatings from PVD film-coated powders — concept and practice [Текст] / I.V. Smirnov, N.A. Dolgov, A.V. Besov // Machines, Technologies, Materials, 2014.—issue 3.— P.28-31.

10. Болдырев А.М. Оценка термодинамических факторов взаимодействия металлохимической присадки со сварочной ванной [Текст] / А.М. Болдырев, Д.А. Гуцин, В.Д. Кузнецов, И.В. Смирнов // Научный вестник Воронежского ГАСУ, Выпуск №2(34), 2014. – С.24-33.

11. Dolgov N.A. Studying the Elastic Properties and Adhesive Strength of Plasma-Sprayed Double-Layer Coatings During Tensile [Текст] / N.A. Dolgov, I.V. Smirnov, A.V. Besov // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2015. – Vol. 54.– Issue 1-2.– P. 40-46.

12. Смирнов І.В. Модифікування плазмово-напиленних покриттів застосуванням плакованих та нанодисперсних порошків [Текст] / І.В. Смирнов, М.А. Долгов, А.В. Черний, В.К. Фурман, І.А. Селіверстов // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк. – 2015. – Випуск № 51. – С. 199-204.

13. Dolgov N.A. Statistical adhesion / cohesion strength criterion for coating [Текст] / N.A. Dolgov, A.V. Ivanchenko, A.V. Besov, V.K. Furman, I.V. Smirnov // Machines, Technologies, Materials, 2015.—issue 7.— P.31-34.

14. Андрейцев А.Ю. Численно-аналитическое определение температуры частиц при плазменном напылении (уточненная модель) [Текст] / А.Ю.Андрейцев, Н.Н. Крюков, И.В. Смирнов, Н.Н. Защепкина// Вестник ХНТУ.— 2015.— №3(54).— С.326-331.

15. Кузнецов В.Д. Износостойкая наплавка с вводом в сварочную ванну нанопорошков [Текст] / В.Д. Кузнецов, Д.В. Степанов // Автоматическая сварка - 2015 №5-6. - С. 52-56.

16. Кузнецов В.Д. Вплив наноксиду кремнію та вуглевмісного матеріалу на зносостійкість наплавленого металу [Текст] / В.Д. кузнецов, Д.В. Степанов, В.М. Пашенко, В.В. Перемітько // Науково-технічний журнал Проблеми тертя та зношування. Київ НАУ 2015 №3 (68); с. 31-38.

17. Peremit'ko V.V. Modifying charge input optimization in arc surfacing with the controlling magnetic influence [Текст] / V.V. Peremit'ko, V.D. Kuznetsov, A.N. Sokol // Applied Mechanics and Materials . – 2014.– Vol. 682. – P. 298-303.

18. Peremit'ko V.V. Inflanza sag parti del telaio indossare macchin stradali [Текст] /V.V. Peremit'ko, V.D. Kuznetsov, I.O.Cherednyk// Italian Science Review.—2014.—Issue 8(17).—P.93-96.

19. Kuznetsov V. Effect of Nano-oxides on the Structure and Properties of Low-alloy Steel Weld Metal [Текст] /V.Kuznetsov, K.Shapovalov // Biuletyn Instytutu Spawalnictwa.-2014.- No. 5.- P.103-108.

20. Перемітько В.В. Дослідження характеру зношування деталей ходової частини гусеничних машин [Текст] / В.В. Перемітько, В.Д. Кузнецов, Є.О. Чередник // Проблеми тертя та зношування. – 2014. – №4(65). – С. 74-82.

21. Кузнецов В.Д. Урахування гранулометричного складу абразиву при відновному наплавленні деталей ходової частини гусеничних машин [Текст] /В.Д. Кузнецов, В.В. Перемітько // Проблеми тертя та зношування. – 2014. – №3(64). – 125-130.

22. Перемітько В.В. Влияние фракционного состава абразивной массы на износостойкость наплавленного металла [Текст] / В.В. Перемітько, В.Д. Кузнецов // Автоматическая сварка - 2015 №10. - С. 52-56.

23. Кузнецов В. Д. Структура и свойства металла сварного шва, модифицированного нано оксидами [Текст] / В.Д. Кузнецов, Д.В. Степанов//Автомат.сварка. – 2015 №11—С.19-24.

#### ***Захищені докторської дисертації:***

Перемітько В.В. на тему «Теоретичні засади та технологічна реалізація адаптаційного відновлення деталей ходової частини дорожніх машин».

Пашенко В.М. на тему «Генерування потоків плазми складних газових систем та керування їх енергетично-просторовими параметрами в процесах нанесення покриття».

**13. Ключові слова:** модифікування, нанопорошки, електродугове наплавлення, плазмово-порошкове напилення, експлуатаційні властивості, зносостійкість