

Л.С. Дерев'янкін, аспірант
П.В. Трет'яков, к.т.н., докторант

А.А. Топоров, к.т.н.

Донецький національний технічний університет

Пауль Бройнінгер, аспірант

Технічний університет Кайзерслаутерна, Німеччина

С.І. Антонюк, д.т.н.

TU Kaiserslautern

Обґрунтування розмірів захисних частинок при їх нанесенні на мікродефекти резервуарів та трубопроводів

Висвітлено один зі способів підтримання належного технічного стану об'єктів сфери питного водопостачання задля підвищення їх надійності та поліпшення якості води. Обрана проблематика досліджується шляхом теоретичного обґрунтування переваги напилювання захисних покриттів на пошкоджені ділянки споруд та обладнання, що утворені поверхневими дефектами. В дослідженні приділено увагу до пошкодження як поверхні на мікрорівні. Резервуар є кінцевим об'єктом у сфері водопостачання, а саме водопідготовки, трубопровід – є об'єктом, безпосередньо через який виконується транспорт води до споживача. Тому підтримання належного технічного стану саме цих об'єктів є необхідним та вагомим. Адже саме ці технічні об'єкти слугують причинами вторинного забруднення води. Створення якісного покриття на пошкоджених ділянках цих об'єктів потребує вирішення ряду завдань, одним з яких є обґрунтування розмірів захисних частинок та їх співвідношення із геометричними параметрами дефектів. У результаті даного дослідження було встановлено необхідність проведення оцінки співмірності захисної частинки і дефекту на мікрорівні. Тобто виявлено вплив масштабного фактора та враховано деформаційні властивості захисної частинки і кромки дефекту, а саме отримано співвідношення початкового розміру захисної частинки і вже деформованої захисної частинки для заповнення об'єму порожнини співмірного дефекту та встановлено, що початковий діаметр захисної частинки варто обирати в діапазоні 1,0...1,1 від розкриття кромки дефекту для оптимального заповнення його порожнини. Враховуючи деформаційні властивості захисної частинки та оцінку висоти заповнення нею співмірного дефекту на мікрорівні, виявлено значний вплив на шорсткість поверхні, зокрема сталевих трубопроводів, встановлено зниження мінімумів шорсткості поверхні трубопроводів.

Ключові слова: мікродефект; захисні частинки; співмірність; шорсткість.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями.

Поліпшення якості питної води є важливим питанням сьогодення, тому пошук нових методів, способів та засобів завжди актуальний. Вивчення питання небезпечного вживання питної води із центрального водопостачання розподілено на десятки проблем, та усі вони об'єднані однією метою – підвищення якості питної води. Це пов'язано з рядом численних чинників, які досліджуються. Небезпечні чинники умовно розділяються на категорії. Згідно з раніше проведеним дослідженням [1, с. 106–108] найважливіша категорія причин, пов'язана з обладнанням, а саме технічним станом водопідготовчих споруд і обладнання. Зниження рівня технічного стану систем водопостачання призводить до значного зниження якості питної води та до великих втрат води під час транспортування до споживача. Тому одною з мір забезпечення належного водопостачання варто вважати пошук нових прогресивних технічних методів з підвищення надійності та довговічності існуючого обладнання (резервуарів і водопровідних труб).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Переважна більшість трубопроводів і резервуарів виготовлена зі сталі, чавуну, залізобетону, які піддаються корозійному руйнуванню. У роботах [2, с. 18; 3, с. 44–46] було визначено класифікацію корозійних процесів, продукти корозії, форми прояву у водоводі міста Харків, вирізнено основні причини мікробіологічної корозії. Існує багато методів для запобігання корозії. В цілому їх розділено на такі групи: нанесення ізолюючих покриттів з корозійностійких матеріалів; видалення з води корозійних агентів; обробка води сповільнювачами (інгібіторами) корозії; катодний захист.

Найбільш поширеним заходом є нанесення захисних антикорозійних покриттів. Саме цей метод є характерним для застосування до всіх об'єктів у системі водопостачання. Загальновідомі захисні покриття від внутрішньої корозії для об'єктів водопостачання такі: піщано-цементні; піщано-цементно-полімерні; цинкові; силікатно-емалеві; лакофарбові; інші, дозволені законодавством. Захисні покриття є ефективним засобом захисту нових об'єктів водопостачальних систем та тих, які вже експлуатуються. У [4, с. 75] було описано технології захисних покриттів як полімерного рукава для зношених трубопроводів питного

водопостачання задля їх реновації та модернізації. Описані технології підходять для ремонту трубопроводів, технічний стан яких близький до аварійного, тому що таким способом здійснюється майже повна заміна сильно пошкоджених ділянок, але ці технології виявляються не зовсім доречними для застосування у трубопроводах, які пошкоджені на мікрорівні. У [5, с. 43] було запропоновано гідроізоляційні матеріали «Пенетрон», Ceresit CR 65, Superflex D1 для захисту залізобетонних конструкцій та доведено, що обрані матеріали більш екологічні, довговічні і безпечні, на відміну від вже застосовуваного торкретбетону. А також запропоновано схему улаштування внутрішньої і зовнішньої гідроізоляції резервуару.

Відносно новим напрямом у нанесенні захисних покриттів є застосування способу холодного газодинамічного напилювання (ХГН). Алхимов А.П. та ін. [6, с. 346–349] описали експериментальні установки ХГН захисних покриттів та зокрема установку для внутрішнього антикорозійного покриття довгомірних труб і мобільну установку ХГН всередині резервуарів. За сукупними характеристиками газодинамічні покриття, одержувані за допомогою таких установок з використанням як робочого газу, наприклад, повітря, обумовлюють їх економічність, та є перспективними. Для реалізації усіх можливостей ХГН для підвищення довговічності споруд та обладнання при використанні конкретних захисних частинок і матеріалів цих поверхонь необхідні детальні дослідження процесів, що виникають при взаємодії захисних частинок з поверхнею, а також властивостей утвореного захисного покриття.

В напрямі ХГН деякою мірою займалися такі зарубіжні дослідники: Parygin A., Smith M.F., Grujicic M., Assadi H. та багато інших [7]. Феномен процесу холодного напилювання дослідили Parygin A. та ін. [8, с. 49]. У публікаціях [7, с. 158; 9, с. 799; 10, с. 7881] описано взаємодію частинки та субстрату під час ХГН: моделювання процесу удару, експериментальні дослідження удару тощо. В [11, с. 118] досліджено оптимізацію надзвукового сопла установки ХГН. Також в [12, с. 39] досліджується структурування поверхні мікрочастинками способом ХГН.

Постановка завдання. Мета дослідження – обґрунтування геометричних параметрів захисної частинки при її нанесенні на пошкоджену ділянку (мікрodefekt) резервуарів чи трубопроводів способом ХГН.

Завдання дослідження:

- оцінити геометричні розміри окремої захисної частинки та дефекту і обрати оптимальні;
- обґрунтувати зниження шорсткості поверхні через нанесення захисної частинки на мікрodefekt.

Викладення основного матеріалу. Кінцевими об'єктами у процесі водопідготовки є ємності, в яких зберігається оброблена вода. Такими ємностями називають резервуари та водонапірні башти. Найбільш поширені сталеві резервуари та резервуари із залізобетону. З часом експлуатації, внаслідок оброблення води речовинами, що підсилюють корозію та руйнування поверхневого покриття, старіння, корозійно-ерозійних процесів, резервуари характеризуються наявністю пошкоджень, дефектів – раковин та тріщин. Тобто знижується їх надійність та довговічність. Об'єкти систем водопостачання мають володіти певним ступенем надійності. Одним із компонентів надійності технічного об'єкта є довговічність. Згідно ДСТУ 2860-94 «Довговічність – властивість об'єкта виконувати потрібні функції до переходу у граничний стан при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту».

Задля підвищення довговічності обрано нанесення захисної частинки на співмірний дефект способом ХГН. ХГН – нове покоління надзвукового напилювання. Частинки рухаються у газовому потоці та прискорюються до надзвукової швидкості у соплі Лавалю, наносяться безперервним потоком на поверхню, що покривається. На відміну від інших способів газотермічного напилювання, при яких порошок нагрівається до температури плавлення, при ХГН частинки нагріваються до температури значно менше температури плавлення [6, с. 75–76]. У дослідженні обґрунтовується вибір геометричних розмірів захисної частинки при її нанесенні на дефект за допомогою ХГН, приймаються до уваги пошкодження поверхні на мікрорівні. На рисунку 1 представлено фото мікротріщин металевої поверхні.

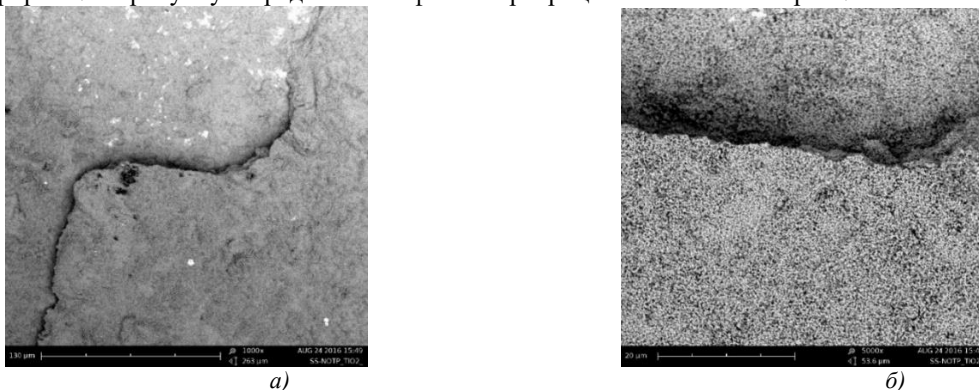
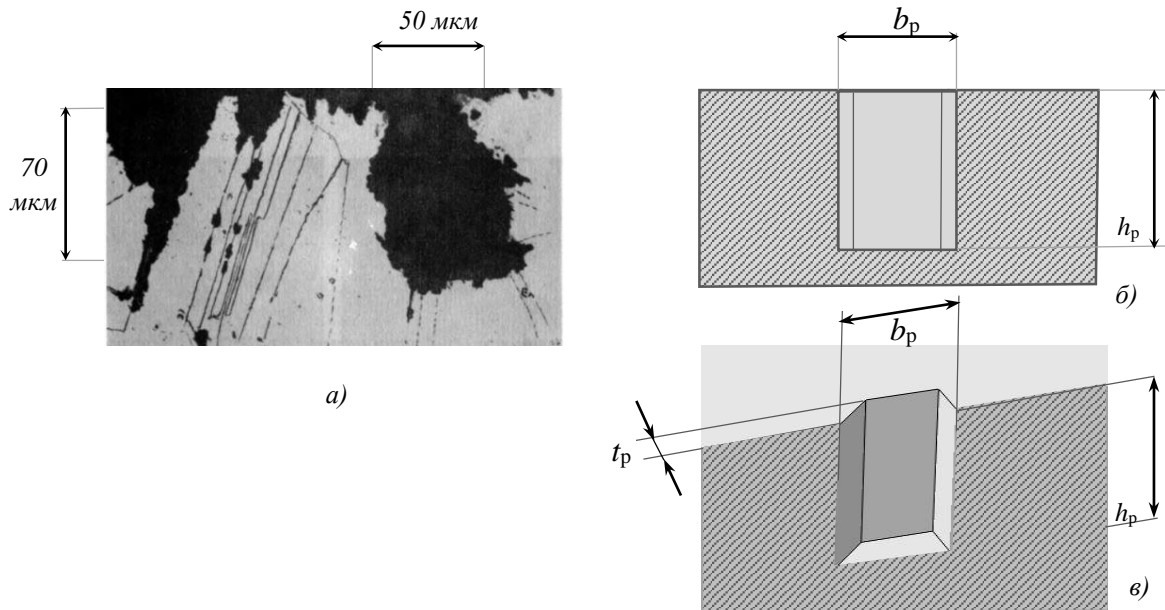


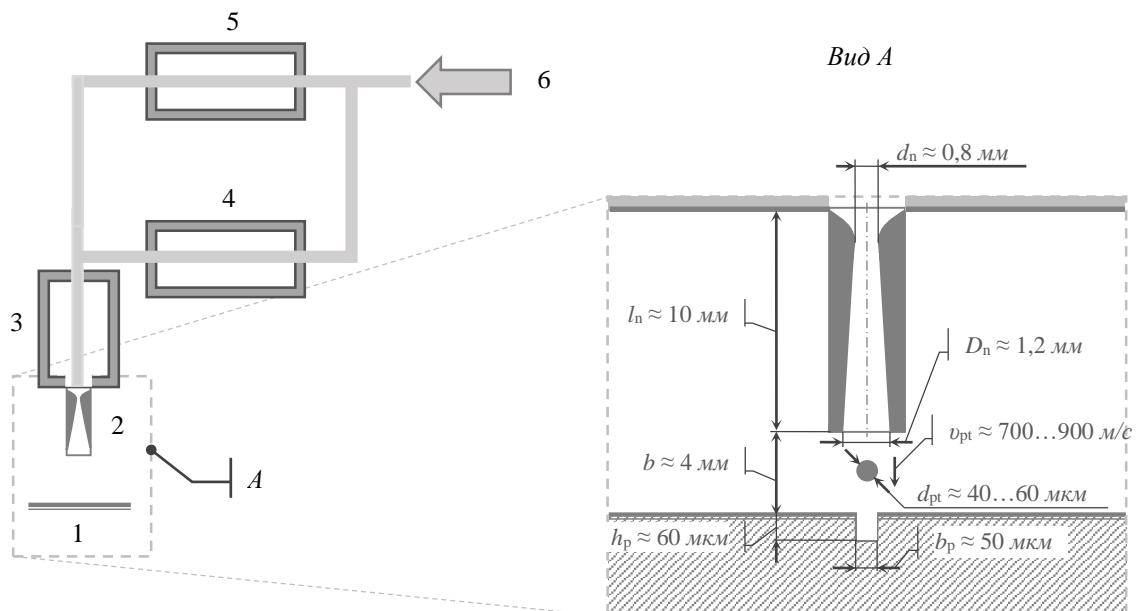
Рис. 1. Тріщина металевої (легована сталь) поверхні на мікрорівні з напиленням TiO_2 :
а) зображення збільшене у 1000 разів; б) зображення збільшене у 5000 разів

Приклад зрізу шліфа сталі марки X18H10T [13, с. 314] у поверхні з дефектами та в тій самій площині схематичний рисунок (проекція 3D моделі) і 3D цієї зони в аксонометрії представлено на рисунку 2:



На рисунку: h_p – висота дефекту; b_p – довжина дефекту; t_p – ширина дефекту
Рис. 2. Приклад поверхневих дефектів сталі марки X18H10T: а) поверхня з дефектами [13, с. 314] та б), в) схематичне зображення тривимірного дефекту

У дослідженні захисні частинки та дефекти мають розміри (висота, довжина, ширина) в діапазоні 100 мкм. Форма захисних частинок близька до форми кулі. Матеріал захисних частинок доречними у використанні є пластичні матеріали та такі матеріали, що є корозійностійкими – мідь, алюміній, діоксид титану. Допускаємо, що удар окремої захисної частинки виконується відцентровано відносно дефекту під прямим кутом. Можлива схема напилювання зображена на рисунку 3:

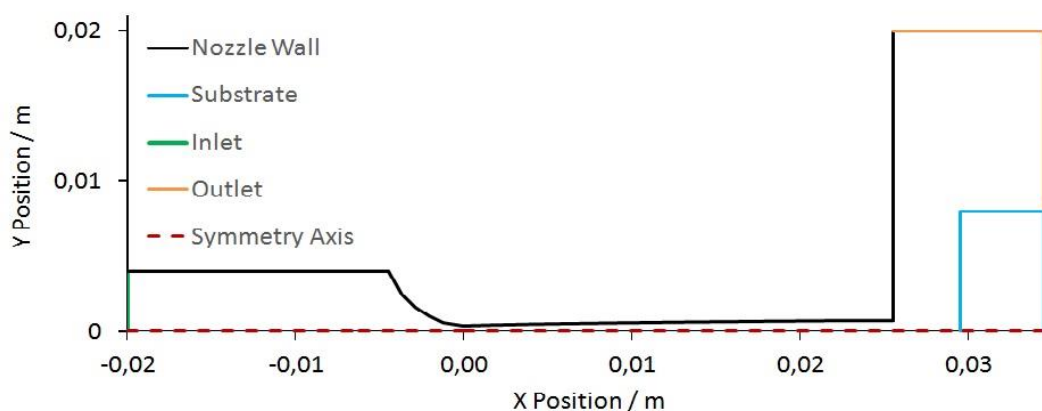


На схемі: 1 – поверхня для напилення; 2 – надзвукове сопло; 3 – головний нагрівальний елемент (температура близько 600 °С); 4 – підігрівальний елемент (температура близько 300 °С); 5 – диспергатор частинок; 6 – робочий газ

Рис. 3. Загальна схема нанесення захисної частинки на дефект зі збільшеним зображенням напилення в зоні дефекту поверхні (розмір захисної частинки умовно збільшено відносно розмірів сопла)

Згідно з наведеною схемою напилювання захисної частинки на дефект: робочий газ 6 подається до диспергатора 5 з частинками та на попередній нагрівач 4. Потім створюється потік руху частинки до головного нагрівального елемента 3 та надзвукового сопла (сопло Лаваля) 2, в якому потік нагрівається до температури нижчої за температуру плавлення матеріалу, з якого виготовлена частинка, та сопло розганяє частинку до надзвукової швидкості. В результаті руху захисної частинки з заданою швидкістю і температурою відбувається її зіткнення з поверхнею дефекту. В процесі зіткнення захисна частинка зчіплюється з поверхнею дефекту. Процес зчіплювання захисної частинки та поверхні досить складний. Якісне зчіплювання супроводжується фізико-механічними процесами [6, с. 70], в яких головну роль відіграють такі особливості: геометрична форма, розмір захисної частинки; матеріал, з якого виготовлена захисна частинка та оброблювальна поверхня, властивості матеріалу; температура, що супроводжує процес зіткнення; швидкість руху захисної частинки.

Для визначення розташування надзвукового сопла відносно поверхні та напилювання захисної частинки було проведено моделювання профілю сопла та визначено області параметрів розташування: відстань краю сопла Лаваля відносно оброблювальної поверхні – 1,5...4 мм; тиск газу на вході в сопло Лаваля – близько 0,9 МПа; температура газу на вході в сопло Лаваля – 773 К; температура газу на виході з сопла Лаваля – 473 К; тиск газу – близько 0,9 МПа (рис. 4):



На моделі: Nozzle Wall – сопло Лаваля; Substrate – поверхня для напилювання; Inlet – вхід; Outlet – вихід; Symmetry Axis – вісь симетрії

Рис. 4. Модель профілю оптимізованого сопла Лаваля

У цьому дослідженні приділено увагу геометричним параметрам захисної частинки та дефекту без урахування матеріалів, з яких виготовлена захисна частинка й оброблювальна поверхня та їх властивостей. При оцінці геометричних розмірів захисної частинки та дефекту головну роль відіграє їх співмірність. Тобто їх розміри мають бути близькими один до одного. Пропонується оцінка співмірності захисної частинки та дефекту на основі заповнення об'єму порожнини дефекту. Припускаємо, що розміри порожнини дефекту: висота, довжина, ширина близькі один до одного (рис. 2):

$$V_p \geq V_d, \quad (1)$$

де V_p – об'єм частинки; V_d – об'єм дефекту.

При зіткненні захисної частинки відбувається її деформація (сплюснення) та деформація дефекту, часткове руйнування дефекту, тому об'єм захисної частинки варто обирати рівним або більшим від об'єму дефекту для оптимального заповнення створеної порожнини дефекту.

Згідно з [6, с. 180] залежність між початковим діаметром частинки і параметрами її деформації (якщо вважати, що форма деформованої частинки близька до форми обернутої параболі): висотою і діаметром основи об'єму деформованої частинки, визначається формулою:

$$d_p = \left(\frac{3}{4} h_p d_c^2 \right)^{1/3}, \quad (2)$$

де d_p – початковий діаметр частинки; h_p – висота деформованої частинки; d_c – діаметр основи деформованої частинки.

Якщо припускаємо проникнення захисної частинки в форму об'єму дефекту та згідно з чисельного моделювання методом кінцевих елементів (ФЕМ) (рис. 5), відповідність розмірів для цієї формули такі:

- діаметр основи деформованої (закріпленої) частинки d_c еквівалентний ширині розкриття кромки дефекту з деяким припустимим незначним відхиленням;
- висота поверхні деформованої (закріпленої) частинки h_p має бути еквівалентна висоті дефекту.

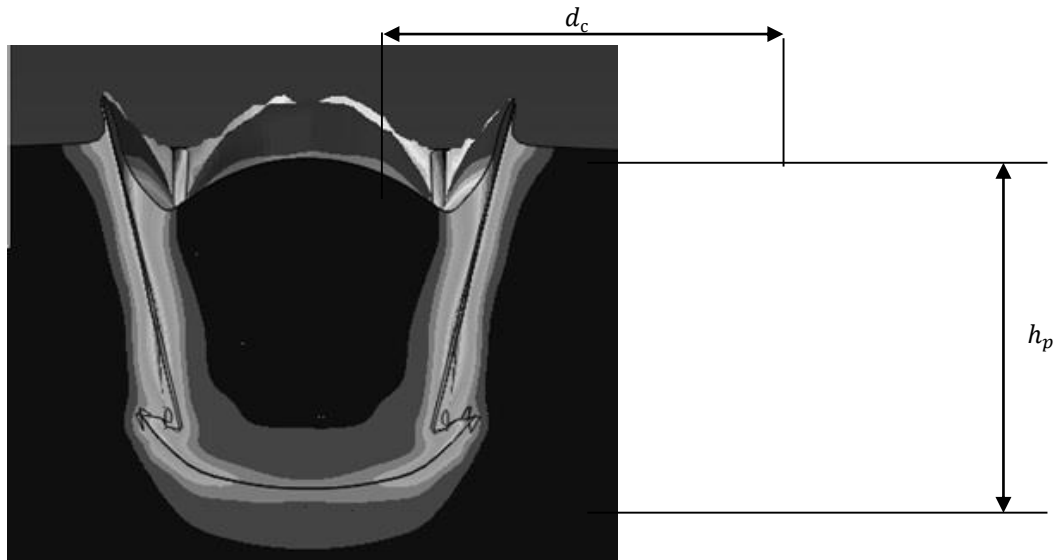


Рис. 5. Модель заповнення порожнини дефекту захисною частинкою

Тобто в нашому випадку, припускаємо, що висота дефекту дорівнює ширині розкриття кромки:

$$d_c \approx h_p, \quad (3)$$

тому з зазначеної формули співвідношення початкового розміру захисної частинки і вже деформованої захисної частинки таке:

$$d_p \approx 0,91d_c, \quad (4)$$

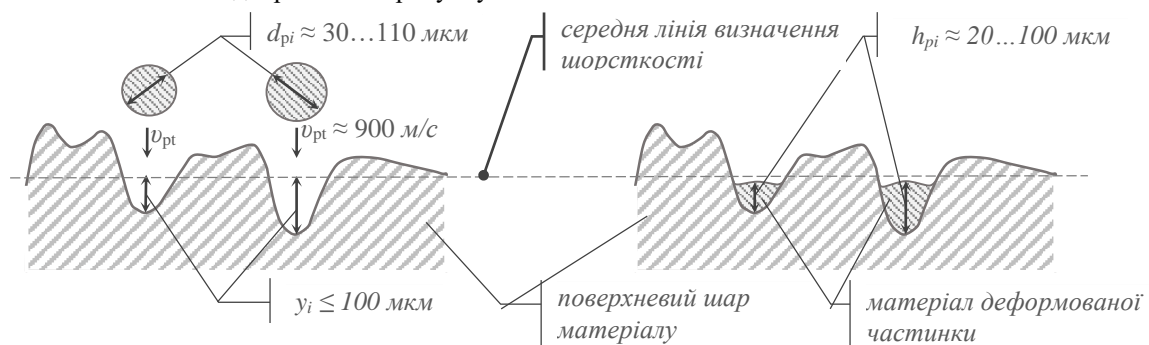
інакше d_p еквівалентний ширині розкриття кромки дефекту.

Виявлене співвідношення підходить у випадку підбору захисної частинки діаметром, який є співмірним розміру дефекту поверхні, на який напилюється захисна частинка. Та виходячи з виявленого співвідношення, необхідно підбирати початковий діаметр захисної частинки в діапазоні 1,0...1,1 від розкриття кромки дефекту для оптимального заповнення його порожнини, що задовольняє оцінку співмірності об'єму захисної частинки на основі заповнення об'єму порожнини дефекту (1).

Напилювання на мікрodefekти співмірних захисних частинок є обґрунтованим засобом нанесення антикорозійних покриттів, використовуючи пластичні матеріали напилюваних частинок, а також для зниження шорсткості поверхні сталевих трубопроводів, оскільки має такі основні переваги для трубопроводів систем водопостачання:

- зниження шорсткості призводить до зниження гідравлічного опору, що безпосередньо підвищує ефективність експлуатації об'єктів систем водопостачання;
- зменшення мінімумів шорсткості знижує імовірність налипання та зчеплення корозійних домішок з поверхнею трубопроводів.

За довідковою літературою приблизні значення абсолютної шорсткості поверхні нових сталевих труб лежать в діапазоні 0,01...0,1 мм, а середнє значення для безшовних – 0,014 мм, зварюваних – 0,06 мм. Тобто досліджувані мікрodefekти (розміром близько 100 мкм) лежать в граничних межах абсолютної шорсткості поверхні сталевих трубопроводів і, в деяких випадках, перевищують значення абсолютної шорсткості. Тому зниження коефіцієнта еквівалентної шорсткості поверхні є вагомим практичним завданням, що вирішується способом нанесення захисної частинки на співмірний дефект за допомогою ХГН. Умовні зображення шорсткості та співвідношення шорсткості поверхні без та з напилюваною частинкою схематично відображено на рисунку 6:



На рисунку: u_i – висота дефекту; h_p – висота поверхні деформованої (закріпленої) частинки
Рис. 6. Схематичне зображення заповнення порожнини співмірного дефекту захисною частинкою

Відповідно до ДСТУ 2413-94, ГОСТ 2789-73 одним із параметрів шорсткості поверхні регламентовано R_a – середнє арифметичне абсолютних значень відхилення профілю в межах базової довжини за дискретного способу оцінювання:

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (5)$$

де y_i – висота відхилень профілю, в нашому випадку висота дефекту (рис. 6); n – кількість дискретних відхилень профілю.

З рисунку 6, враховуючи заповнення дефекту закріпленою частинкою, R_a матиме вигляд:

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - h_{pi}|, \quad (6)$$

де h_{pi} – висота поверхні деформованої (закріпленої) частинки.

Тоді для заповнених дефектів висота відхилень профілю, враховуючи співвідношення (2), (3):

$$y_i' \approx 0,09h_{pi} \quad (7)$$

Отже, середнє арифметичне абсолютних значень відхилення профілю в межах базової довжини за дискретного способу оцінювання, підставивши (7) у формулу (5), матиме вигляд:

$$R_a \approx \frac{0,09}{n} \sum_{i=1}^n |h_{pi}| \quad (8)$$

Такі співвідношення прийнятні для абсолютних відхилень значень висоти профілю, що характеризують мінімуми абсолютної шорсткості. Отже, приймаючи до уваги отримані співвідношення, встановлено зменшення мінімумів шорсткості поверхні сталевих трубопроводів приблизно на 90 %.

Ліквідація дефектів окремою захисною частинкою відомим способом ХГН дозволяє підвищити довговічність об'єктів водопідготовки, знизити рівень вторинного забруднення води, внаслідок корозійно-ерозійного руйнування, що становить практичну цінність у підтриманні належного технічного стану об'єктів водопідготовки. Напилювання окремої захисної частинки на співмірний дефект може слугувати як попередній супроводжуючий шар, враховуючи шорсткість поверхні, перед суцільним захисним покриттям.

Висновки та перспективи подальших досліджень. При застосуванні ХГН можна не тільки наносити суцільне покриття на поверхню обладнання, а й наносити окрему захисну частинку на співмірний дефект поверхні або необхідну кількість захисних частинок для повздовжнього дефекту, коли довжина значно перевищує ширину та висоту дефекту. У цьому дослідженні було:

- виявлено вплив масштабного фактора та враховано деформаційні властивості захисної частинки і кромки дефекту, а саме отримано співвідношення початкового розміру частинки і вже деформованої захисної частинки для заповнення об'єму порожнини співмірного дефекту та встановлено, що початковий діаметр захисної частинки варто обирати в діапазоні 1,0...1,1 від розкриття кромки дефекту для оптимального заповнення його порожнини;

- враховуючи деформаційні властивості захисної частинки та оцінку висоти заповнення нею співмірного дефекту на мікрорівні, виявлено значний вплив на шорсткість поверхні, зокрема сталевих трубопроводів, встановлено зменшення мінімумів шорсткості поверхні сталевих трубопроводів приблизно на 90 %.

Перспективні напрями подальшого дослідження:

- встановлення закономірностей і параметрів зчеплення захисної частинки з поверхнею дефекту, враховуючи матеріали, з яких виготовлені напилювані частинка та оброблювальна поверхня, їх фізико-механічні властивості, температурні параметри процесу зіткнення, швидкість руху захисної частинки;

- враховуючи різноманітні геометричні форми дефектів та встановлені параметри і закономірності процесу зчеплення захисної частинки і поверхні дефекту, встановити параметри напилювання захисної частинки під різноманітними кутами руху частинки, що будуть оптимальними в залежності від форми дефектів.

Список використаної літератури:

1. Дерев'янкін Л.С. Оцінка причинно-наслідкового стану якості питної води Донбасу в умовах нестабільної ситуації сьогодення / Л.С. Дерев'янкін, А.А. Топоров // Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти. – К. : НТУУ «КПІ ім. Сікорського», 2017. – С. 106–108.
2. Алейникова А.И. Исследование коррозионных процессов трубопроводов водоснабжения / А.И. Алейникова // Містобудування та територіальне планування. – 2013. – № 48. – С. 17–24.
3. Волков В.Н. К вопросу о коррозионном разрушении трубопроводов водоснабжения в процессе длительной эксплуатации / В.Н. Волков, С.С. Пилиграмм, А.И. Алейникова // Водопостачання та водовідведення. – 2017. – № 3. – С. 43–47.
4. Защитные покрытия как фактор обеспечения прочностных и гидравлических показателей восстанавливаемых трубопроводов / В.А. Орлов, С.П. Зоткин, К.Е. Хренков, И.С. Дежина и др. // Вестник МГСУ. – 2015. – № 1. – С. 74–82.
5. Маслій І.В. Корозія і захист залізобетонних конструкцій в системі водопостачання / І.В. Маслій // Вісник СНАУ. Будівництво. – 2013. – № 8 (17). – С. 42–44.
6. Холодное газодинамическое напыление / А.П. Алхимов, С.В. Кликов, В.Ф. Косарев, В.М. Фомин. – М. : Физматлит, 2010. – 536 с.
7. Kosarev V.F. The Cold Spray materials deposition process: Fundamentals and applications / V.F. Kosarev, S.V. Klinkov, A.N. Papyrin. – England : Woodhead Publishing Limited, 2007. – 362 p.
8. Papyrin A.N. Cold Spray Technology / A.N. Papyrin // Advanced Materials & Processes. – 2001. – № 160 (3). – P. 49–51.
9. From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying / T.Schmidt, H.Assadi, F.Gärtner, H.Richter and other // Journal of Thermal Spray Technology. – 2009. – No.18 (5–6). – P. 794–808 [Electronic resource]. – Access mode : <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9357-7>.

10. Wen-Ya Li Some aspects on 3D numerical modeling of high velocity impact of particles in cold spraying by explicit finite element analysis / Wen-Ya Li, Wei Gao // *Applied Surface Science*. – 2009. – Iss. 18. – P. 7878–7892 [Electronic resource]. – Access mode : <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.04.135>.
11. Buhl S. Optimization of a Laval nozzle for energy efficient cold spraying of microparticles / S.Buhl, P.Breuninger, S.Antonyuk // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2017. – P. 115–122.
12. Surface structuring of case hardened chain pins by cold-sprayed microparticles to modify friction and wear properties / S.Buhl, K.Schmidt, D.Sappok, R.Merz and other // *Particuology*. – 2015. – № 21. – P. 32–40.
13. Сокол И.Я. Структура и коррозия металлов и сплавов / И.Я. Сокол, Е.А. Улянин, Э.Г. Фельдгандлер. – М. : Металлургия, 1989. – 400 с.

References:

1. Derev'jankina, L.S. and Toporov, A.A. (2017), «Ocinka prychnyno-naslidkovogo stanu jakosti pytnoi' vody Donbasu v umovah nestabil'noi' situacii' s'ogodennja», *Chysta voda. Fundamental'ni, prykladni ta promyslovi aspekty*, NTUU «KPI im. Sikors'kogo», K., pp. 106–108.
2. Alejnykova, A.Y. (2013), «Yssledovanye korrozyonnyh processov truboprovodov vodosnabzhenija», *Mistobuduvannja ta terytorial'ne planuvannja*, No. 48, pp. 17–24.
3. Volkov, V.N., Pylygramm, S.S. and Alejnykova, A.Y. (2017), «K voprosu o korrozyocyonnom razrushenju truboprovodov vodosnabzhenija v processe dlytel'noj ekspluatacyu», *Vodopostachannja ta vodovidvedennja*, Vol. 3, pp. 43–47.
4. Orlov, V.A., Zotkyn, S.P., Hrenkov, K.E., Dezhyna, Y.S. and other (2015), «Zashhytnyye pokrytyja kak faktor obespechenija prochnostnyh y gydravlycheskyh pokazatelej vosstanavlyvaemyh truboprovodov», *Vestnyk MGSU*, Vol. 1, pp. 74–82.
5. Maslij, I.V. (2013), «Korozija i zahyst zalizobetonnyh konstrukcij v systemi vodopostachannja», *Visnyk SNAU. Budivnyctvo*, Vol. 8 (17), pp. 42–44.
6. Alhymov, A.P., Klynkov, S.V., Kosarev, V.F. and Fomyn, V.M. (2010), *Holodnoe gazodynamycheskoe napyulenye*, Fyzmatlyt, M., 536 p.
7. Kosarev, V.F., Klinkov, S.V. and Papyrin, A.N. (2007), *The Cold Spray materials deposition process: Fundamentals and applications*, Woodhead Publishing Limited, England, 362 p.
8. Papyrin, A.N. (2001), «Cold Spray Technology», *Advanced Materials & Processes*, 2001, No. 160 (3), pp. 49–51.
9. Schmidt, T., Assadi, H., Gärtner, F., Richter, H. and other (2009), «From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying», *Journal of Thermal Spray Technology*, No. 18 (5–6), pp. 794–808, [Online], available at: <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9357-7>
10. Wen-Ya, Li and Wei, Gao (2009), «Some aspects on 3D numerical modeling of high velocity impact of particles in cold spraying by explicit finite element analysis», *Applied Surface Science*, Iss. 18, pp. 7878–7892, [Online], available at: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.04.135>
11. Buhl, S., Breuninger, P. and Antonyuk, S. (2017), «Optimization of a Laval nozzle for energy efficient cold spraying of microparticles», *Materials and Manufacturing Processes*, pp. 115–122.
12. Buhl, S., Schmidt, K., Sappok, D., Merz, R. and other (2015), «Surface structuring of case hardened chain pins by cold-sprayed microparticles to modify friction and wear properties», *Particuology*, Vol. 21, pp. 32–40.
13. Sokol, I.Ja., Ul'janin, E.A. and Fel'dgandler, Je.G. (1989), *Struktura i korrozija metallov i splavov*, Metallurgija, M., 400 p.

Дерев'янкiна Лiлiя Сергiївна – аспiрант кафедри обладнання видобувних та переробних комплексiв Донецького національного технічного університету

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9141-0600>

Наукові інтереси:

– захисні покриття технологічних об'єктів та проблеми водопідготовчого обладнання.

E-mail: liliia.dereviankina@donntu.edu.ua

Трет'яков Павло Васильович – кандидат технічних наук, докторант кафедри прикладної механіки Донецького національного технічного університету

Наукові інтереси:

– процеси накопичення дефектів та відновлення конструкцій з вогнетривких матеріалів.

Топоров Андрій Анатолійович – кандидат технічних наук, завідувач кафедри обладнання видобувних та переробних комплексiв Донецького національного технічного університету

Наукові інтереси:

– забезпечення надійності, ефективності та техногенної безпеки технологічного обладнання перероблявальних комплексiв.

Бройнінгер Пауль – аспiрант кафедри механічних технологічних процесiв та часток Технічного університету Кайзерслаутерна, Німеччина.

Антонюк Сергiй Iгорович – доктор технічних наук, завідувач кафедри механічних технологічних процесiв та часток Технічного університету Кайзерслаутерна, Німеччина.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2019.