Відгук
офіційного опонента д.т.н., проф. Новомлинця О.О.
на дисертаційну роботу Захарової І.В.
«Теоретичні і технологічні основи ресурсо- та енергозбереження при дуговому напиленні з використанням пульсуючого розпилювального потоку повітря»
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені технології»

Розроблений у 1918 р. німецьким вченим Шоопом М.У. процес електродугового напилення металевих матеріалів, оснований на розпилюванні рідкого металу електродів, розплавлених електричною дугою та перенесених потоком стислого повітря, широко впроваджено у промисловості.

Цей процес приваблює простотою обладнання, економічністю та широким діапазоном складу покриттів. Основним з недоліків цього процесу є значне окислення металу електродів киснем розпилювального потоку повітря. Японські вчені О. Хасуі і А. Морігакі встановили і опублікували кількісні данні щодо окислення (вигоряння) легуючих компонентів електродів, яке складає від 30 до 45 % в залежності від кисневої активності елементів. Тому процесу зниження вигоряння легуючих компонентів електродів при електродуговому напилені приділяється вченими значна увага. Пропонуються різні прийоми зокрема використання для розпилювання нейтральних і інертних газів у чистому вигляді і в суміші з повітрям; використання суміші повітря з вуглецевими газами, комбінаціями газового (пропан-бутанового) полум'я та ін. Як показала практика такі методи потребують значних витрат і ускладнення обладнання.

Автором дисертаційної роботи пропонується достатньо економічний метод дугового напилення з використанням пульсуючого розпилювального потоку повітря, що забезпечує значне зниження умов контакту розпилювального повітря з рідким металом електродів. Ефект пульсації досягається за рахунок включення в систему подачі повітря пульсатора, розробленого автором за прикладом роботи ротаційного клапану, конструкція якого потребує одноразових незначних витрат на виготовлення. Тому дослідження в роботі, спрямовані на розробку раціональної конструкції пристрою, дозволили встановити оптимальні частоти пульсації при яких відбувається мінімальне вигоряння легуючих елементів напилюваного матеріалу.

Дослідження впливу пульсацій на формування напиленого шару з підвищеними експлуатаційними властивостями на технологічні показники дугового напилення (продуктивність, ефективність використання дротів-

електродів, міцність зчеплення покриття з основою, зниження кількості оксидів в покритті), є актуальними, а представлена дисертаційна робота своєчасною. Актуальність підтверджується також значною кількістю іноземних публікацій і актами впровадження на промислових підприємствах України.

Метою роботи є розробка науково обґрунтованої ресурсозберігаючої технології електродугового напилення з використанням пульсуючого розпилювального повітря задля відновлення та зміцнення робочих поверхонь деталей машин і конструкцій.

Аналіз змісту дисертації:

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, а також сформульовані наукова новизна і практичне значення досягнень, наведені дані про апробацію наукових досліджень, відзначений особистий внесок автора та перелік публікацій по темі роботи.

У першому розділі представлено аналіз існуючих даних щодо електродугового напилення як одного з перспективних і ефективних технологічних процесів підвищення зносостійкості деталей у різноманітних галузях, представлені напрями над якими працюють сучасні дослідники. Наведено, що суттєвим недоліком дугового напилення є процес окислювання крапель рідкого металу під час відокремлювання та транспортування розпилювальним потоком повітря. Представлений аналіз сучасних даних щодо удосконалення технології напилювання показує на недостатнє вивчення характеру впливу розпилювального повітря на вигорання легуючих елементів в розпилювальному матеріалі, недостатньо досліджені умови впливу розпилювальних електродів на структуру розпилювального потоку. Приділено увагу процесам газодинаміки, щодо обтікання газовим потоком твердих тіл. За результатами проведеного аналізу автором обґрунтовано метод та визначено основні напрямки дисертаційної роботи щодо розробки практичних рішень на підвищення експлуатаційних властивостей покриттів за рахунок використання пульсуючого розпилювального потоку.

У другому розділі представлені результати досліджень змін у повітряному потоці при перетині розпилювальних електродів. Показано, що зміни відбуваються в залежності від форми перешкод і інших факторів в залежності від рівня числа Рейнольдса. Дослідження змін у повітряному потоці проводилось при тіньовому фотографуванні на установці для отримання газоспектрограм. По результатах вимірювання статичного тиску між торцями електродів та вивчення отриманих газоспектрограм встановлена наявність падіння тиску за перешкодами (електродами), яке досягає суттєвих значень. Результати дослідження були використані при розробці конструкції

пульсатора для розпилювальної системи металізатора. У розділі наведені методи досліджень які забезпечили обґрунтованість уточнень в комплексній схемі розподілу сил процесу дугового напилення, яка доповнена наявністю сили завихрення при обтіканні розпилювальних електродів і вплив на форму і транспортування частинок рідкого металу.

В третьому розділі представлено принцип методу дугового напилення із застосуванням пульсуючого розпилювального потоку повітря. Наведені особливості роботи пульсатора. З використанням програми Mathcad на базі роботи ротаційного клапану вибрано оптимальну схему перетину клапаном газового потоку. Підтверджено, що зміна площі прохідного перетину при обертанні клапана пульсатора має пульсуючий характер відповідно змінюється й витрата повітря. Результати теоретичних досліджень підтверджені наведеними осцилограмами напору струменя в залежності від застосування прохідного перерізу сопла з частотою пульсацій. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень розроблена та представлена конструкція пристрою-пульсатора, яка забезпечує стабільність отримання розпилювального потоку при наявності зависокого тиску 0,5-0,6 МПа у повітряній системі металізатора.

В четвертому розділі продовжені дослідження характеристик пульсуючого повітряного розпилювального потоку. Представлені форми для розрахунків змін загальних витрат повітря за один оберт клапана пульсатора і маси кисню розпилювального повітря. Представлені відповідні графічні зображення залежностей. В розділі представлені розрахунки щодо уточнення долі газового потоку, який безпосередньо може контактувати з рідким металом електродів. Наведена розрахункова схема і математичний вираз на базі якого розроблена номограма для визначення маси кисню у розпилювальному потоці в залежності від ступеня перекриття прохідного каналу пульсатора повітряної системи металізатора. В номограмі враховується ступень перекриття каналу, частота пульсацій потоку для дроту діаметром 2 мм при швидкості подачі 3м/хв протягом 10 с. Номограма дозволяє встановлювати масу кисню в розпилювальному потоці в залежності від частоти пульсацій і ступеня перекриття каналу пульсатора.

В п’ятому розділі обґрунтування можливості застосування перетинів розпилювального потоку у зв’язку з факторами, що впливають на форму та дисперсність частинок покриття при електродуговому напиленні з пульсуючим розпилювальним потоком. Розглянуто дві схеми дії сил на рідкий метал електродів при пульсуючому методі напилення: при наявності дії потоку на рідкий метал електродів і при його відсутності. Детально розглянута розрахункова схема для встановлення маси рідкого металу, що може накопичуватись на торці суцільного електроду за рахунок тепла електричної

дуги при відсутності повітряного потоку. За аналогію прийнято закономірності плавлення металевого електроду при зварюванні на повітрі. Розрахунки проводили для схеми рідкого металу у формі напівеліпсоїда на торці електроду. На базі проведених розрахунків розроблена і представлена номограма для визначення маси рідкого металу на торцях електродів. На номограмі показана залежність маси рідкого металу від параметрів електричної дуги – току і напруження, а також зміни діаметру розпилювальних електродів. З ростом діаметру електродів маса рідкого метала зростає як і при збільшені рівня току. В розділі представлено математичну модель плавлення електродів і умов відокремлення рідкого металу при пульсуючому розпилювальному потоці. Наведено що умова відділення сферичної або напівеліпсоїдної форми краплі з торця електрода при дії тільки імпульсного потоку повітря виконується, якщо аеродинамічна сила буде більше сил поверхневого натягу, що утримують краплю.

Приведені результати досліджень дозволяють автору стверджувати що при наявності терміну накопичення рідкого металу розпилювальних електродів і імпульсів розпилювального потоку забезпечується відділення крапель рідкого металу з торців електродів, коли аеродинамічна і електромагнітна сили перевищують рівень сил поверхневого натягу, що забезпечує відсутність короткого замикання між електродами при короткотерміновій відсутності газового потоку. У підтвердження наведених представлені фотографії зміни дисперсності частинок покриття в залежності від частоти пульсацій. Оптимальним значенням пульсацій потоку визначено частоту 70 Гц. Автор стверджує, що головним чинником, який визначає дисперсність частинок при електродуговому напиленні є енергія електричної дуги і не враховує чітко роль розпилювального потоку повітря.

В шостому розділі визначається вплив пульсуючого повітря при дуговому напиленні на технологічні параметри процесу. Наведені формули та графічне зображення залежностей ефективності використання розпилюваного матеріалу та продуктивності процесу від частоти пульсацій повітря. При застосуванні пульсуючого потоку продуктивність зростає на 25 %, а ефективність використання матеріалу на 40 %. З представлених графічних залежностей показано що міцність зчеплення покриття з основою збільшується при впроваджені пульсуючого розпилювального потоку і досягає максимуму для частот 70-80 Гц для покриттів з дротів Св-08А і цинку. Наведені данні, які показують зниження кисню розпилювального повітря завдяки графіків з підвищення вмісту легуючих компонентів у покритті. Максимальний вміст досягається при частоті пульсацій 70 Гц для дротів зі сталі 12Х18Н10Т та Св08А. Представляє інтерес дослідження залишкових напружень що виникають у покритті. В розділі представлено методику визначення залишкових напружень за прогином зразків після пошарового

напилення. Розроблена математична модель впливу шарів покриття на напружений стан. Розглянуто вплив залишкових напружень на працездатність напилених покриттів в тому числі й при використанні пульсуючого розпилювального повітря при електродуговому напиленні. В якості металографічних досліджень представлені мікроструктури покриттів в залежності від частоти пульсацій. Визначено, що в міру використання пульсуючого розпилювального потоку покриття мають більш рівномірну мікроструктуру із збільшенням дрібнодисперсних частинок, а також зменшення оксидних прошарків між частинками покриття. Наведено також що при наявності частоти пульсацій розпилювального потоку мікротвердість частинок покриття збільшується за рахунок зменшення вигоряння легуючих елементів. Наведено порівняльний аналіз зносостійкості покриттів при абразивному зношуванні. Максимальна стійкість досягається при частоті пульсацій 70±5 Гц, для дротів 12Х18Н10Т та Св-08А збільшення абразивної стійкості складає 26 %. Необхідно виділити, що підвищення абразивної стійкості покриттів відповідає змінам хімічного складу в залежності від частоти пульсацій повітря.

В сьомому розділі представлена розроблена конструкція пульсатора для практичного впровадження на промислових підприємствах, що забезпечує оптимальний рівень пульсацій повітряного потоку і складається з системи підведення і виходу розпилювального повітря, еластичної муфти, масивної бази, пульта управління. При виконанні договорів з підприємствами щодо впровадження дугового напилення з пульсуючим розпилювальним потоком було розроблено компонування відповідної ділянки цеху, на базі філії ПРАТ «Запоріжсталь» підприємства «МЕТІНВЕСТ-ПРОМСЕРВІС» у 2019 році використовувала електродугове напилення для відновлювання і зміцнення деталей комплексу обладнання шнеків і лопатей змішувальної групи для ТОВ «Запоріжвогнетрив». Впровадження методу забезпечило підвищення стійкості відновлених деталей на 25 % з річним економічним ефектом 726 тис. грн.

На підприємстві ТОВ «ПСК ЕвроСтройПроект», використовувалась технологія електродугової металізації з пульсуючим розпилювальним потоком. Пульсатор був встановлений на металізатор OSU Hessler 300A Anticor. Виконувалися замовлення по антикорозійному посиленню металоконструкцій: секції огорожі, каркасні вироби. За період використання були встановлені значні зниження витрат матеріалів, що наносяться (близько 42%), підвищення продуктивності (близько 26%), підвищення міцності зчеплення покриття з основою (близько 22%). Реальний економічний ефект, отриманий підприємством ТОВ «ПСК «ЄВРОСТРОЙПРОЕКТ», складає 1,476 млн. грн. Загальний економічний ефект від впровадження результатів дисертації становить 2,202 млн. грн., що підтверджено відповідними актами.

Ступень обґрунтованості наукових положень висновків і рекомендацій сформульованих у дисертації. Встановлені в роботі закономірності обґрунтовані із застосуванням експериментальних досліджень, аналітичних розрахункових методів, сучасних розрахункових алгоритмів, що застосовані на фундаментальних положеннях теорії зварювальних процесів, загальної та фізичної хімії, фізики, газодинаміки та кінетики зниження впливу кисню розпилювального потоку повітря на технологічні особливості процесу електродугового напилення з використанням пульсуючого розпилювального потоку повітря.

Обґрунтованість представлених в роботі положень, висновків та рекомендацій підтверджуються аналізом відповідності розрахункових і експериментальних досліджень. Представлені в роботі наукові положення і рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями, що підтверджується визнаннями на міжнародних і вітчизняних конференціях з питань теоретичної, прикладної та експериментальної механіки, надійності інженерних конструкцій, математичного моделювання і інформаційних технологій у зварюванні та споріднених процесах.

Обґрунтованість наукових положень висновків і рекомендацій підтверджується результатами численних теоретичних досліджень та відповідністю їх зіставленням з експериментальними даними, отриманими за допомогою вимірювання мікротвердості, випробування на абразивний знос та методів тіньової фотографії (прозорого розпилювального повітряного потоку у поляризованому проміні світла). Також експериментальні данні базуються на математичному моделюванні при розрахунку конструктивних параметрів пристрою-пульсатору і отримані методом математичної обробки даних з використанням програмних продуктів Microsoft Excel, MathCad, Ansys-ED.

Отримані авторкою закономірності не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями та накопиченим досвідом. Наукові положення, висновки і рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями.

Достовірність отриманих результатів підтверджується використанням сучасних методів і засобів досліджень, загальноприйнятих методик проведення досліджень властивостей формування та взаємодії пульсуючого розпилювального потоку з твердими електродами. Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджено численними результатами випробувань зразків напилених покриттів та газоспектрограмами, а також розробкою і впровадженням на підприємствах пристрою-пульсатора, що підтверджено співвідношенням розрахунків з експериментальними даними.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в теоретичному узагальнені та розширені уяви про взаємодію розпилювального потоку повітря

з електродами при електродуговому напиленні. Автором вперше відкоригована комплексна схема розподілу сил при дуговому напиленні, з урахуванням закономірностей обтікання перешкод газовим потоком із визначенням зони завихрень потоку при обтіканні розпилюваних електродів та введенням додаткової сили, спрямованої на відділення рідкого металу з їх торців. На основі теоретичного аналізу і проведених експериментальних досліджень автором вперше обґрунтовано метод електродугового напилення з використанням пульсуючої подачі повітря в зону плавлення електродів задля зниження негативного впливу кисню на хімічний склад і властивості покриття. Розроблена математична модель плавлення, формування і відокремлення рідкого металу у вигляді крапель сферичної і напівеліпсоїдної форми. Встановлені співвідношення максимальних значень аеродинамічної сили і сили поверхневого натягу, що діють на рідкий метал при наявності пульсацій, величина яких становить: $Fa/F\sigma = 10{,}104$ – для сферичної краплі, $Fa/F\sigma = 56{,}44$ – для напівеліпсоїдної краплі. В роботі отримала подальший розвиток теорія газодинаміки при протіканні газу через круглі отвори (сопло) шляхом розробки методології розрахунку маси кисню розпилювального повітря, що контактує з рідким металом електродів, в залежності від частоти пульсацій повітря в межах 20-120 Гц, на основі чого встановлено, що при частоті пульсацій 60-80 Гц витрата розпилювального повітря знижується у 3-4 рази. Вперше отримано залежності ступеню вигоряння хімічних елементів при дуговому напиленні в залежності від частоти пульсацій повітряного потоку. Визначено оптимальну частоту (60-75 Гц), за якої досягається суттєве (на 35-38 %) зменшення угару вуглецю та легуючих елементів при застосуванні електродів різного рівня легування (Св-08А, 12Х18Н10Т) із відповідним зростанням їх у покритті та поліпшення однорідності структури, що забезпечує підвищення в 1,5 рази міцності зчеплення покриттів з основою. Запропонована математична модель розрахунку залишкових напружень в напиленому газотермічному покритті, із застосуванням якої встановлено нерівномірний розподіл напружень по товщині покриття із максимальним значенням в перехідній зоні. Вперше показано, що застосування пульсуючого розпилювального потоку зменшує залишкові напруження, при цьому максимальне зниження досягається при частості пульсації розпилювального потоку 65÷75 Гц внаслідок зниження окислення розпилюваного матеріалу і, відповідно, кількості оксидів в покритті.

Практичне значення роботи. На основі встановлених автором роботи закономірностей процесу електродугового напилення з пульсуючим розпилювальним потоком повітря створена енерго- і ресурсозберігаюча технологія електродугового напилення, яка забезпечує зниження витрат розпилювального матеріалу на угар легуючих елементів розпилюваних електродів на 20-30 % та підвищує продуктивність процесу на 25 %. Вперше

запропоновано алгоритм розрахунку параметрів пульсатора на основі конструкції ротаційного клапану. Теоретичні та практичні результати роботи впроваджені в навчальний процес у ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

Впровадження результатів. На основі отриманих дисертанткою результатів теоретичних та експериментальних досліджень на підприємстві ТОВ «ПСК ЄвроСтройПроект» реалізовано технологію напилення антикорозійних покриттів на металевих поверхнях. Використана технологія забезпечило зниження витрат матеріалів на 42 %, підвищення продуктивності на 26 %, підвищення міцності зчеплення покриття з основою на 22 %, що забезпечило отримання економічного ефекту в розмірі 1,50 млн. грн. Підприємство «МЕТІНВЕСТ-ПРОМСЕРВІС» використало на базі філії ПАТ «Запоріжсталь» технологію електродугового напилення з пульсуючим розпилювальним струменем при відновленні і зміцненні деталей обладнання для приготування вогнетривних сумішей, що підвищило експлуатаційну стійкість відновлених деталей на 25 % із економічним ефектом біля 0,72 млн. грн.

Повнота викладу основних результатів роботи в наукових виданнях. Основні результати досліджень опубліковані в 43 виданнях, які включають 1 монографію; 23 статті, з них 19 у фахових та зарубіжних виданнях (з них 1 стаття у НБД Scopus Q3 і 6 статей у НБД Index Copernicus); 19 тез доповідей; 1 патент на корисну модель(комплекс для електродугової металізації).

Напрями досліджень авторки прі виконанні кандидатської дисертації «Снижение дефектности сварных соединений низколегированных сталей путем оптимизации технологии сварки» не співпадають з напрямами досліджень докторської дисертації.

Висновки дисертації відображають основні отримані результати роботи в якій наведено теоретично узагальнені питання щодо вирішення актуальної науково-технічної проблеми розробки обґрунтованої технології нанесення покриття методом дугової металізації з використанням пульсуючої подачі розпилювального повітря. Особливу увагу у висновках приділено зниженню негативного впливу кисню розпилювального повітряного потоку для отримання необхідного формування структури і хімічного складу напиленого металу, що важливо при відновлюванні та зміцненні деталей машин і конструкцій, які працюють в умовах абразивного, газоабразивного та помірного ударно-абразивного зносу та корозійних середовищах. Висновки сформовані конкретно і логічно відповідно до змісту роботи.

Зміст дисертаційної роботи і автореферату ідентичний. Автореферат повністю висвітлює результати що наведені в дисертації.

Зауваження та коментарі до дисертаційної роботи:

1. В літературному огляді крім посилань на вказані автором схеми і графічні залежності не наведені прізвища авторів фундаментальних досліджень на які посилається автор;
2. В розділі 2 рис. 2.6 відсутні визначення ділянок газового струменю – основної, перехідної та початкового газодинамічного стрибка;
3. В розділі 2 до схеми рис. 2.7 не наведено обґрунтування залучення у якості трубки Піто порожнистої медичної голки і її вплив на структуру газового потоку. Бажано наявність фотографії обладнання.
4. У формулі (1.3.) розділ 1 не представлено характеристики складових під коренем;
5. На рис. 1.20 розділу 1 не позначені важливі елементи металізатора з надзвуковим витіком розпилювального струменя при спалювані складової повітря з природним газом.
6. На рис. 2.1 розділ 2 відсутні розміри щодо розташування елементів установки що важливо для оцінювання достовірності результатів;
7. На рис. 2.11 та 2.13 розділ 2 не позначені елементи при зображені спектрограм;
8. На рис. 3.4, 3.8 розділ 3 не позначено розташування прохідного каналу пульсатора і клапана щодо зміни отвору;
9. В розділі 3.3 не представлена методика досліджень характеру імпульсів на виході розпилювального повітря із сопла металізатора;
10. Не наведені елементи структури газоспектрограм, якщо авторка бажала продемонструвати характер змін у газовому потоці при наявності частоти пульсацій.
11. Потребує додаткових пояснень поява максимального співвідношення аеродинамічної і сили поверхневого натягу для сферичної і напівелепсоїдної краплі.
12. Не зрозуміло як отримані у розділі 5.4 данні враховуються при розробці технології електродугового напилення з пульсуючою подачею повітря.
13. З рис. 6.6 не зрозуміло який кут скошування штифта використано у приведеному на знімку пристрої для дослідження міцності зчеплення при складних умовах.
14. У надпису до рис. 6.20 розділу 6 не наведено для якого матеріалу визначали мікротвердість часток покриття при наведеній частоті пульсацій.

Загальні висновки. Розглянуті вище результати досліджень дозволяють вважати, що дисертаційна робота Захарової І.В. є завершеною науково-дослідною розробкою, що присвячена вирішенню актуальної проблеми ресурсо- та енергозбереження при електродуговому напиленні покриттів за рахунок науково-обґрунтованої технології зниження впливу кисню розпилювального струменю на рідкий метал електродів. Використання методу пульсуючої подачі розпилювального повітря при електродуговому напиленні покриттів забезпечує значне зниження вигорання легуючих компонентів покриття, поліпшення властивостей і зниження собівартості.

За обсягом представлених результатів досліджень, повнотою наукового та практичного значення їх рівня, представлена дисертаційна робота відповідає вимогам П. 9,10 положення «Порядок присудження наукових ступеней і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» постанова Кабінету міністрів України № 567 від 24 липня 2013р. щодо докторських дисертацій, а її автор Захарова Ірина В'ячеславівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології.

Офіційний опонент доктор технічних наук,
доцент, ректор Національного університету
«Чернігівська політехніка», МОН України О.О. Новомлинець

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ * Національний університет "Чернігівська політехніка" * 05460798 *