

Відгук

офіційного опонента доктора технічних наук, проф. Макаренко Н.О.
на дисертацію Захарової Ірини В'ячеславівни „Теоретичні і
технологічні основи ресурсо- та енергозбереження при дуговому напиленні з
використанням пульсуючого розпилювального потоку повітря”,
що подана до спеціалізованої вченої ради Д 12.052.01 на здобуття
наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06
„Зварювання та споріднені процеси і технології”.

Дисертаційну роботу виконано у ДВНЗ „Приазовський державний
технічний університет”. Вона складається зі вступу, семи розділів, висновків,
переліку посилань з 244 найменувань. Дисертація викладена на 345
сторінках, включає 137 рисунків, 17 таблиць та 3 додатки.

Представлено автореферат дисертації, який містить 44 сторінки
машинописного тексту, в тому числі 43 роботи, що опубліковані автором за
темою дисертації.

1. Актуальність теми дисертації, її зв'язок з напрямками відповідної галузі науки.

На теперішній час в технології газотермічного напилення вирішено ряд
ключових питань, що дозволило стабілізувати процес горіння дуги в
високошвидкісному повітряному потоці; знизити хімічну взаємодію кисню з
розплавленим металом і процес інтенсивного вигорання легуючих елементів,
але це вдалося зробити тільки частково (за рахунок використання сумішей
інертних газів та високолегованих дротів, а це, в свою чергу, значно збільшує
вартість нанесеного покриття).

Найбільш часто в практиці електродугового напилення для відновлення
деталей машин застосовують методи зниження негативного впливу кисню на
рідкий метал електродів за рахунок використання конструкцій
розпилювальних сопел. При цьому має місце підвищення собівартості
покриттів за рахунок додаткових витрат для удосконалення розпилювального
потoku. В рамках цього підходу вперше запропоновано використовувати
пульсацію повітряного потоку при дуговій металізації. Пульсуюче
розпилення потоку повітря, що досягається використанням пульсатора
конструкції (на зразок ротаційного клапану), дає можливість отримати
напилений шар з необхідними експлуатаційними характеристиками та
дозволяє підвищити якість напиленого металу без суттєвих капітальних
витрат. Крім того, вирішуються питання ресурсо- та енергозбереження,
оскільки знижується вигорання хімічних елементів та зменшується витрата
повітря. Залишається невирішеною низка наукових і технологічних питань,
пов'язаних із газодинамікою потоку при пульсаціях повітря, впливу частоти
пульсацій на рівень кількості кисню у розпилювальному потоці, вигоранні
хімічних елементів матеріалу за рахунок пульсуючої подачі повітря, на якість
напиленого шару при дуговому напиленні, що призводить до необхідності
подальших інтенсивних досліджень в цьому напрямку. Таким чином, тема
дисертаційної роботи є актуальною для підприємств вітчизняного

31.03.2021
292-67/45

промислового виробництва, де може застосуватися реновація деталей із застосуванням електродугового напилення.

Актуальність роботи підтверджується виконанням дослідних робіт на базі ДВНЗ „Приазовський державний технічний університет”: «Удосконалення процесів нанесення покриттів на деталі машин методами наплавлення, напилення» (№ держреєстрації 0112U005780); «Управління процесами плавлення металу при зварюванні та споріднених процесах» (наплавлення, газотермічне напилення) (№ держреєстрації 0113U006280); «Дослідження та розробка обладнання та матеріалів для зварювання та споріднених технологій» (№ держреєстрації 0115U004948); «Дослідження процесів плавлення металевих складових при зварюванні та споріднених технологіях» (№ держреєстрації 0116U008769); «Дослідження процесів взаємодії газових та шлакових складових з металевою фазою при зварюванні та споріднених технологіях» (№ держреєстрації 0117U007314); «Дослідження процесів управління перенесенням рідкого електродного металу при зварюванні та споріднених технологіях» (№ держреєстрації 0118U006938).

У виконанні названих робіт дисертант приймала безпосередню участь в якості керівника або відповідального виконавця.

2. Мета роботи. Метою роботи є розробка наукової обґрунтованої ресурсо- та енергозберігаючої технології дугової металізації із використанням пульсуючої подачі розпилювального потоку повітря.

3. Об'єкт дослідження – процес формування розпилювального потоку повітря і перенесення часток рідкого металу електродів при дуговій металізації. В якості предмета дослідження виступає вплив пульсуючого розпилювального потоку повітря на технологічні показники та якісні характеристики напиленого шару.

4. Аналіз змісту дисертації. У вступі дисертаційної роботи вирішено науково-технічну проблему розробки і освоєння ресурсо- та енергозберігаючої технології відновлення з одночасним збільшенням робочого ресурсу деталей машин і конструкцій, що працюють в умовах абразивного, ударно-абразивного, газо-абразивного та інших видів зносу, застосування дугової металізації із використанням пульсуючого розпилювального потоку повітря.

В *розділі 1* виконано аналітичний огляд стану питання та обґрунтовано вибір напряму досліджень. Розглянуто переваги дугової металізації серед споріднених процесів, доведено, що це є один із перспективних і ефективних технологічних процесів для відновлення та підвищення зносостійкості деталей у різноманітних галузях; виділені проблемні сторони, над якими триває робота низки дослідників.

Літературні джерела та виробничі випробування, в яких сучасними підходами досліджені особливості формування газоповітряного потоку, різні конструкції сопел, комбінації газових сумішей та нейтральних газів, показують, що на процес окислення та вигорання легуючого матеріалу впливають ряд факторів, серед яких найбільш значущим є структура

розпилювального потоку. На підставі цього були визначені вузькі місця та напрямки для подальшого дослідження та удосконалення.

Розглянуто існуючі напрямки зниження впливу кисню розпилювального повітря, основою яких є гіпотеза про виникнення особливих течій при обтіканні суцільного тіла стаціонарним і пульсуючим повітряним потоком. Цей принцип може бути застосований до розпилювального потоку в різних методах нанесення покриттів і є особливо актуальним для дугової металізації, де транспортуючий повітряний потік є одним з ключових факторів якості нанесеного покриття. Показано, що поперечне обтікання тіл пульсуючим потоком відноситься (на даний час) до числа найменш вивчених явищ, тому цей процес є найбільш цікавим для досліджень і визначення їх основних напрямків.

В *розділі 2* наведені результати дослідження стану газового середовища між торцями розпилюваних електродів при різних зазорах між ними. При наявності на шляху газового потоку перешкод відбуваються зміни в характері газового потоку, які залежать від форми перешкоди, характеристик потоку та інших факторів (причому стан потоку за перешкодою залежить від числа Рейнольдса, що показано у наведених тінювих фотографіях).

Дослідження проводилися на потужних електрометалізаційних установках на профільній кафедрі і на двох промислових підприємствах. Розпилення матеріалу здійснювалось повітряним струменем з робочим тиском стисненого повітря 0,5-0,6 МПа та його витратою в межах 60-150 м³/год. Для формування повітряного розпилювального струменя використовували головки з соплом циліндричної форми. Отримано газоспектрограму газового струменя, що витікає з циліндричного сопла і омиває електроди при дуговій металізації. В результаті досліджень встановлено наявність падіння тиску за перешкодою (у вигляді електродів) на значну величину.

Дослідження залежності характеру пульсуючого розпилювального струменя, проведене за допомогою тінювого фотографування в зоні торців електродів, показало, що наявність електродів впливає на розподіл сумарного тиску в міжелектродному просторі і по довжині розпилювального струменя. З метою визначення впливу газового струменя на формування дугового розряду і частинок розпилюваних електродів отримані експериментальні дані, що дозволили зробити уточнення в комплексній схемі розподілу сил в процесі дугової металізації. Підтверджено наявність падіння тиску між торців електродів до рівня атмосферного.

В *розділі 3* запропоновані заходи щодо зменшення впливу транспортуючого повітря на якість напиленого шару. Розроблено метод дугової металізації із застосуванням пульсуючого розпилювального струменя повітря. Дослідження проводили на обладнанні з пристроєм, який забезпечує пульсуючий режим витікання розпилювального струменя повітря. Конструктивно пульсуючий пристрій (надалі пульсатор) представляв собою циліндричний корпус з вхідним і вихідним патрубком для підведення і

виведення стисненого повітря, всередині якого встановлено вал з отвором і можливістю обертання. Пульсатор дозволяє отримати пульсуючий режим розпилювального струменя в межах 0-120 Гц із застосуванням різного перерізу прохідного отвору клапана пульсатора, який може змінювати характер наростання імпульсу.

В роботі представлено математичне моделювання перекриття клапана пульсатора і сопла різних форм з використанням програми MathCAD. В розділі наведені осцилограми змін динамічного напору струменя для круглого та прямокутного розрізу отвору валу пульсатора, спектрограми зміни повітряних потоків в залежності від частоти імпульсів. Всі залежності, що представлені в роботі, отримані на експериментальному пульсаторі, який надалі був впроваджений у промислове виробництво.

Для реалізації способу дугової металізації з пульсуючим розпилювальним потоком, з урахуванням теоретичних висновків та отриманих практичних попередніх результатів, запропонована конструкція пульсатора для промислового використання.

В *розділі 4* представлено кількісну оцінку зниження витрати повітря і кількості кисню розпилювального струменя при взаємодії з електродами, а саме отримано графічну залежність впливу частоти імпульсів на об'єм повітря, що проходить крізь сопло, для значень долі перекриття біля 80 % впродовж 60 с, яка показала, що об'єм розпилювального повітря значно знижується з підвищенням частоти пульсацій і ступеня перекриття пульсатора. Наведені аналітичні залежності дозволяють розрахувати об'єм повітря і масу кисню в струмені, що розпилює електродний метал.

Визначено витрату повітря (для випадку пульсуючої подачі), що омиває електроди, при перекритті каналу сопла клапаном пульсатора, яка залежить від співвідношення площ омивання при перекритті і площі перерізу потоку без перекриття. Результати розрахунків зміни маси кисню в потоці зведено у графічні залежності та узагальнено у вигляді номограми, яка дозволяє визначити оптимальний ступень перекриття каналу і частоту пульсацій.

В *розділі 5* проведено дослідження факторів, що впливають на форму та дисперсність частинок покриття при дуговому напиленні з пульсуючим розпилювальним струменем. Представлені розрахункові схеми сил, що діють на рідкий метал електродів при дуговому напиленні для випадків максимальної дії розпилювального потоку повітря при пульсуючій подачі та коли дія розпилювального потоку відсутня (повне припинення подачі повітря).

За результатами розрахунків побудовані графічні залежності маси рідкого металу на торцях електродів (анод і катод) від параметрів режиму металізації в діапазоні досліджуваних величин та узагальнені в номограмі. Встановлено співвідношення максимальної аеродинамічної сили і сили поверхневого натягу, що обумовлює відділення рідкого металу з торців електродів при пульсуючому розпилювальному потоці.

В *розділ 6* розглядається вплив пульсуючого розпилювального потоку повітря на технологічні параметри напилення.

Представлені формули та побудовані графічні залежності визначення ефективності використання матеріалів та продуктивності процесу від частоти пульсацій. Визначено, що застосування пульсуючого розпилювального потоку при дуговому напиленні сприяє підвищенню продуктивності $N_f \approx 25\%$ і ефективності використання напилюваного матеріалу $\gamma'_{max} \approx 40\%$ при частоті пульсацій 65 Гц за рахунок зниження окисного впливу розпилювального потоку і раціонального використання енергії дуги.

Уточнено, що залишкові напруги в напиленому газотермічному покритті розподіляються нерівномірно по товщині і мають максимальне значення в перехідній зоні. З пошаровим наростанням товщини покриття, величина напруги зростає не пропорційно, сповільнюючи зростання, однак сумарна усадочна сила в шарі і, відповідно, рівень напружень в перехідній зоні, безперервно зростають.

В *розділі 7* представлено принципову схему конструкції пульсатора для промислового застосування, зовнішній вигляд комплексної установки для забезпечення пульсуючого розпилювального струменя при дуговій металізації. Наведено результати промислового впровадження розроблених технологій і обладнання на підприємствах – ВАТ «ПСК ЄвроСтройПроект» (м. Маріуполь), ПАТ «Запоріжвогнетрив» (м. Запоріжжя) сумісно з ВАТ «МЕТІНВЕСТ-ПРОМСЕРВІС». Впровадження забезпечило суттєве зниження витрат матеріалів, що наносяться, підвищення продуктивності процесу (близько 26%), підвищення міцності зчеплення покриття з основою (близько 22%), зростання експлуатаційної стійкості відновлених деталей (25%). Економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи склав 2193 тис. грн.

5. Ступень обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій. Наведені в роботі закономірності обґрунтованні із застосуванням експериментальних досліджень, аналітичних розрахункових методів і існуючих розрахункових алгоритмів, що засновані на фундаментальних положеннях теорії зварювальних процесів, фізики, теоретичної та практичної газодинаміки, теоретичної та прикладної механіки. Представлені в роботі наукові положення і рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями, що підтверджується інформаціями на міжнародних і вітчизняних науково-технічних конференціях з питань теоретичної та прикладної механіки, надійності інженерних конструкцій, математичного моделювання, інформаційних технологій у зварюванні та споріднених технологіях, зокрема, газотермічного напилення. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується результатами теоретичних досліджень та відповідністю їх зіставлення з експериментальними даними, отриманими за допомогою вимірювання мікротвердості часток покриття, аналізу мікроструктур, випробування на абразивний знос, методу теплової фотографії розпилювального повітряного потоку у поляризованому промені світла, математичного моделювання при

розрахунку конструктивних параметрів пристрою-пульсатора, математичної обробки даних з використанням програмних засобів, пакетів Microsoft, Excel, MathCAD, ANSYS-ED, заснованих на численних рішеннях. Отримані авторкою закономірності не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями та існуючим науковим досвідом, узгоджуються з існуючими концепціями.

6. Достовірність отриманих результатів підтверджується використанням сучасних загальноприйнятих методів досліджень властивостей формування та взаємодії розпилювального потоку з розпилювальними електродами при електродуговому напиленні з використанням пульсуючого потоку повітря, особливостей технології напилення та якості покриттів. Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтвержені численними результатами випробувань зразків напилених покриттів, газоспектрограмами тіньового фотографування повітряного потоку, розробкою і впровадженням на підприємствах пристрою - пульсатора, співпадінням результатів теоретичних розрахунків з експериментальними даними.

7. Наукова новизна результатів досліджень полягає в теоретичному обґрунтованні принципу дугової металізації з використанням пульсуючої подачі повітря в зону плавлення електродів, який базується на узгодженні швидкості формування крапель рідкого металу на електродах під дією теплової енергії електричної дуги із частотою подачі розпилювального повітря для їх видалення з торців електродів, що дозволяє мінімізувати негативний вплив кисню на хімічний склад і властивості покриттів та зменшити витрати енергії на проведення процесу.

З урахуванням закономірностей обтікання перешкод газовим потоком і встановленого падіння тиску за електродами відкоригована комплексна схема розподілу сил при дуговому напиленні із визначенням зони завихрень потоку при обтіканні розпилюваних електродів та введення додаткової сили, спрямованої на відділення рідкого металу з їх торців.

Розроблена математична модель плавлення, формування і відокремлення рідкого металу у вигляді сферичних і напівеліпсоїдних крапель з торців електродів при використанні пульсуючого потоку розпилювального повітря, встановлені співвідношення максимальних значень аеродинамічної сили і сили поверхневого натягу, що діють на рідкий метал при наявності пульсацій.

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 вигорання хімічних елементів при дуговій металізації в залежності від частоти пульсацій розпилювального повітря. 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 вмісту елементів та однорідності структури у покритті, 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 частоті пульсації розпилювального потоку 65÷75 Гц внаслідок зниження окислення розпилюваного матеріалу і, відповідно, кількості оксидів в покритті.

8. Практичне значення дисертаційної роботи полягає у тому, що розроблено технологію дугової металізації із використанням пульсуючого розпилювального потоку, яка забезпечує зниження угару легуючих елементів розпилюваних електродів на 20-30 % та поліпшує експлуатаційні властивості покриттів.

Запропоновано алгоритм розрахунку параметрів пульсатора на основі конструкції ротаційного клапану та розроблено оптимальну конструкцію пульсатора для експериментального та промислового використання.

Сформульовано рекомендації щодо використання пульсуючого розпилювального струменя повітря, яке дозволяє підвищити продуктивність процесу на 25 % та ефективність використання матеріалу на 40 %.

Впровадження результатів. Технологію електродугової металізації з пульсуючим розпилювальним потоком впроваджено на підприємстві ТОВ «ПСК ЄвроСтройПроект» при нанесенні антикорозійних покриттів на металевих поверхнях. Використання технології 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 електродугової металізації 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.

Теоретичні та практичні результати роботи впроваджені в навчальний процес у ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

9. Повнота викладу основних результатів роботи в наукових фахових виданнях. За темою дисертаційної роботи опубліковано 43 наукові праці, у тому числі 20 статей у спеціалізованих виданнях, з них 12 статей у наукових виданнях, що входять у наукометричні бази даних Scopus, Scopus, 6 статей у зарубіжних виданнях, 1 монографія, 1 патент, 19 тез доповідей.

Напря́м досліджень кандидатської дисертації не співпадає з дослідженнями і напрямками досліджень докторської дисертації.

10. **Висновки по дисертаційній роботі** відображають наукові і практичні результати, в яких наведено теоретично узагальнені питання щодо вирішення однієї з актуальних проблем розробки метода ресурсо- та енергозбереження при електродуговому напиленні за рахунок використання пульсуючого розпилювального потоку повітря для відновлення та зміцнення деталей машин і конструкцій, що працюють в умовах абразивного, газоабразивного зносу та корозійних середовищах. Висновки сформульовані логічно щодо змісту дисертації.

Зміст дисертації і автореферату ідентичні. Автореферат повністю висвітлює результати, що наведені в дисертації.

11. **Зауваження та коментарі по дисертації.**

1) Не всі елементи позначені на рис. 1.2; 1.27 (розділ 1), які враховуються автором при корегуванні загальної схеми електродугового напилення.

2) У розділі 2.2 (рис.2.10) відсутні пояснення щодо джерела поляризованого проміння при отриманні газоспектрограм.

3) У розділі 2.7 показано схему виміру (рис. 2.7) і графік зміни тиску між торцями електродів (рис. 2.2), а в уточненій комплексній схемі напилення вказані зони розрідження поза електродами.

4) Розрахункова схема (рис.4.4) не відображає реального співвідношення діаметрів електродів і діаметра сопла.

5) В дисертації не чітко представлені графічні залежності (на скриншотах рис. 4.6, 4.8, 4.10).

6) В розділі 2.4.2 „Випробування на абразивний знос” не наведено данні про матеріал і режим випробування.

7) В розділі 5.2 наведена уточнена схема дії сил на рідкий метал при утворенні напівеліпсоїдної краплі, а розглядається і утворення сферичної краплі, однак схема відсутня.

8) В розділі 6.5 (рис. 6.20) не вказано хімічний склад покриття на шкалі вимірювань мікротвердості, не приведена методика вимірювання.

9) У загальних висновках пункти 1 і 5 носять анатоційний характер і не підтверджують наукову інформацію.

10) В розділі 7 тексту дисертації не позначена наявність додатку, в якому крім актів впровадження наведено сертифікат про участь у міжнародній конференції.

Загальна оцінка дисертаційної роботи – відмічені у Відгуку зауваження не стосуються кваліфікаційних ознак роботи і не знижують її загального рівня.

Дисертаційна робота Захарової Ірини В'ячеславівни „Теоретичні і технологічні основи ресурсо- та енергозбереження при дуговому напиленні з використанням пульсуючого розпилювального потоку повітря” є завершеною роботою, в якій отримано нові науково обґрунтовані теоретичні та практичні

результати, а саме розроблено ресурсо- та енергозберігаючі технології при електродуговому напиленні покриттів за рахунок зниження впливу кисню повітря при використанні пульсуючої подачі розпилювального потоку. Нова технологія забезпечує зниження собівартості покриттів і підвищення їх якості.

Дисертаційна робота Захарової Ірини В'ячеславівни **„Теоретичні і технологічні основи ресурсо- та енергозбереження при дуговому напиленні з використанням пульсуючого розпилювального потоку повітря”**, за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.03.06 „Зварювання та споріднені процеси і технології”.

Дисертація є завершеною науковою працею, де отримано вагомі науково обґрунтовані результати та висновки. Актуальність обраної теми дослідження, ступінь наукової новизни, теоретична та практична значимість, стиль викладення матеріалів дослідження дають підстави зробити висновок, що структура, зміст та оформлення дисертації відповідають вимогам пп. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор – Захарова Ірина В'ячеславівна, заслуговує на присудження ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 „Зварювання та споріднені процеси і технології”.

Завідувач кафедри «Обладнання і технологій зварювального виробництва» Донбаської державної машинобудівної академії,
доктор технічних наук, професор,
академік Підйомно-транспортної Академії наук України



Н.О. Макаренко

Підпис Макаренко Н.О. засвідчую:

Ректор Донбаської державної машинобудівної академії,
доктор технічних наук, професор



В.Д.Ковальов