

ВІДГУК

офиційного опонента на дисертаційну роботу Захарової Ірини В'ячеславівни «Теоретичні і технологічні основи ресурсо- та енергозбереження при дуговому напиленні з використанням пульсуючого розпилювального потоку повітря», що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології

Актуальність теми. Дисертаційна робота Захарової І. В. присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми – підвищенню функціональних можливостей та конкурентоздатності процесу електродугового нанесення покріттів шляхом переходу до ресурсо- енергозбережних методів ведення процесу формування двофазного потоку.

Серед методів газотермічного нанесення покріттів електродугове напилення є одним з найбільш широко поширеніх (більше 20% ринку нанесення газотермічних покріттів). Метод характеризується простотою обладнання, високою продуктивністю і економічністю технології. Але можливості електродугового напилення (ЕДН) для створення функціональних покріттів суттєво обмежені через незворотні зміни у хімічному складі вихідного матеріалу у ході розпилення дротів-електродів, а також при формуванні двофазного потоку і утворенні покриття на основі. На сьогодні дослідниками запропоновано досить багато варіантів вирішення цієї проблеми, але повною мірою вона досі не вирішена. Ускладнення конструкцій розпилювачів, застосування спеціальних газових середовищ, додаткові організаційні заходи, поряд із частковим вирішення згаданої вище проблеми, призводять до підвищення витрат енергії та матеріальних ресурсів і, відповідно, суттєвого підвищення вартості отриманих покріттів.

Одним із перспективних шляхів покращання захисту вихідного матеріалу від негативного впливу кисню навколошнього середовища може бути застосування модульованого (пульсуючого) розпилювального потоку повітря із використанням механічного пульсатора. Евакуація розплавленого металу з дротів-електродів пульсуючим потоком повітря змінює газодинамічні умови контактування металу із розпилювальним потоком повітря, що за певних обставин може привести до обмеження процесу насичення розплавленого металу киснем повітря. Встановлення цих умов і обставин, а також наслідків застосування модульованого потоку розпилювального повітря на структуру та якість отриманих покріттів є цілим комплексом актуальних наукових задач, які потребують вирішення.

Ірина Вікторівна

29.03.2021

270-67/85

Дисертаційні дослідження виконано в рамках науково-дослідних робіт, які виконувались ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» та є складовою НДР на кафедрі «Обладнання та технологія зварювального виробництва (Автоматизація та механізація зварювального виробництва)»: «Удосконалення процесів нанесення покриттів на деталі машин методами наплавлення, напилення» (№ держреєстрації 0112U005780 -2013 р.); «Управління процесами плавлення металу при зварюванні та споріднених процесах» (наплавлення, газотермічне напилення) (№ держреєстрації 0113U006280 -2014 р.); «Дослідження та розробка обладнання та матеріалів для зварювання та споріднених технологій» (№ держреєстрації 0115U004948 -2016 р.); «Дослідження процесів плавлення металевих складових при зварюванні та споріднених технологіях» (№ держреєстрації 0113U008769 -2017 р.); «Дослідження процесів взаємодії газових та шлакових складових з металевою фазою при зварюванні та споріднених технологіях» (№ держреєстрації 0117U007314 -2018 р.); «Дослідження процесів управління перенесенням рідкого електродного металу при зварюванні та споріднених технологіях» (№ держреєстрації 0118U006938 -2019 р.), що є також підтвердженням актуальності роботи автора.

Структура та зміст роботи. У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження. Вказана наукова новизна та практична цінність отриманих результатів. Наведено відомості щодо апробації роботи, особистого внеску здобувача та публікацій. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами та темами.

У першому розділі наведено огляд робіт за тематикою дисертаційної роботи, визначені напрямок та основні задачі дослідження.

Основні положення роботи викладені в розділах 2-7.

У другому розділі досліджувався стан газового середовища між торцями електродів, що розпилюються.

Показано, що за наявності на шляху газового потоку перешкоди 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 тіньових фотографіях.

Дослідження проводилися на електродуговому розпилювачі типу ЕМ-17. Розпилення матеріалу здійснювалось струменем повітря. Для формування розпилювального струменя повітря використовувались головки з соплом циліндричної форми. В результаті досліджень отримана газоспектрограма газового струменя, що витікає з

циліндричного сопла і омиває електроди. З'ясовано, що результати відповідають теоретичним передумовам: за перешкодою у вигляді електродів наявне падіння тиску, що сягає значних величин (дані отримані прямим зондовим вимірюваннями тиску).

Дослідження залежності характеру пульсуючого розпилювального струменя проводили за допомогою тіньового фотографування струменя в зоні торців електродів.

З метою визначення впливу газового струменя на формування дугового розряду і частинок електродів, що розпилюються, проведено фотографування міжелектродної зони і дуги. Отримані експериментальні дані дозволили зробити уточнення у комплексній схемі розподілу сил в процесі електродугового напилення. Підтверджено наявність падіння тиску проміж торців електродів до рівня атмосферного.

Результати досліджень стали основою для розробки додаткових конструктивних елементів системи напилення з метою формування модульованого струменя розпилювального повітря.

У третьому розділі запропоновані заходи щодо зменшення впливу розпилювального повітря на якість покриття шляхом застосування методу електродугового нанесення покриття із застосуванням пульсуючого розпилювального струменя повітря. Дослідження проводили на комплексі обладнання з пристроєм, що забезпечує пульсуючий режим витікання розпилювального струменя повітря. У пристрої для модуляції потоку повітря (надалі пульсаторі) відбувається періодичне механічне перекривання потоку повітря за допомогою валу з отвором. Вал обертається із регульованою швидкістю, що дозволяє отримати пульсуючий режим розпилювального струменя повітря в межах (0...120) Гц. Варіанти конструкції обертального валу із застосуванням прохідного отвору різної конфігурації та перерізу дозволяють змінювати характер наростання імпульсу.

Проведено математичне моделювання процесу перекриття прохідного отвору пульсатора і різних форм соплового пристрою з використанням програми Mathcad.

Отримані осцилограми зміни динамічного напору струменя для круглого та прямокутного розрізу отвору валу пульсатора; спектrogramами зміни повітряних потоків залежно від частоти імпульсів. Всі результати отримані на експериментальному пульсаторі, який надалі став прототипом промислового варіанта.

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

У четвертому розділі проведено кількісне оцінювання зниження витрати повітря і кількості кисню розпилювального струменя при взаємодії з електродами: встановлена графічна залежність впливу частоти імпульсів на об'єм повітря, що проходить крізь сопло для значень долі перекриття біля 80 %, протягом 60 с. Показано, що об'єм розпилювального повітря значно знижується із підвищеннем частоти пульсацій і ступеня перекриття пульсатора. Наведені аналітичні залежності дозволяють розрахувати загальний об'єм розпилювального повітря і масу кисню в струмені.

Визначено витрату повітря, що омишає дроти-електроди, для випадку його пульсуючого подавання при перекритті каналу сопла пульсатором. Показано, що витрата залежить від співвідношення площ омивання при перекритті і площині перерізу потоку без перекриття.

Результати розрахунків зміни маси кисню в потоці зведено у графічні залежності та узагальнені у вигляді номограми, яка дозволяє визначати оптимальну ступень перекриття каналу і частоту пульсацій.

У п'ятому розділі досліджувались фактори, які впливають на форму та дисперсність частинок покриття при електродуговому напиленні з пульсуючим розпилювальним струменем.

Представлені розрахункові схеми сил, що діють на рідкий метал електродів при електродуговому напиленні у разі максимальної дії розпилювального потоку повітря при пульсуючій подачі, та у випадку, коли дія розпилювального потоку відсутня (повне припинення подачі повітря). Визначено величину сили поверхневого натягу краплі при розплавленні електроду, що розпилюється.

Запропонована розрахункова електромагнітна схема, що утворена сталевими електродами та електричною дугою, яка впливає на процес плавлення електродів і утворення частинок при електродуговому напиленні.

Представлена розрахункова схема маси рідкого металу m_{pm} , що відокремлюється з торця суцільного електроду. Отримане рівняння, яке дозволяє визначати радіус кривини рідкого металу R_{kp} залежно від швидкості подавання електродів, діаметра дротів-електродів і кута між ними, а також для випадку максимального накопичення рідкого металу на торці електрода.

За результатами розрахунків побудовані графічні залежності маси рідкого металу на торцях електродів (анод і катод) від параметрів режиму розпилення в діапазоні досліджуваних величин. Залежності мають вигляд номограм.

Встановлено співвідношення максимальної аеродинамічної сили до сили поверхневого натягу, яке обумовлює евакуацію рідкого металу з торців електродів при пульсуючому розпилювальному потоці.

Підтвердженням достовірності отриманих залежностей можуть бути результати промислового застосування запропонованого метода

нанесення покриття різними матеріалами (цинк, цинко-алюміній), що представлені у вигляді фотографій зразків покриттів.

У шостому розділі розглянутий вплив пульсуючого розпилювального потоку повітря на технологічні параметри напилення, такі як: продуктивність процесу, ефективність використання дротів-електродів, міцність зчеплення покриття з основою.

Представлені формули та побудовані графічні залежності ефективності використання матеріалів, та продуктивності процесу від частоти пульсацій.

Встановлено, що застосування пульсуючого розпилювального потоку при електродуговому напиленні сприяє підвищенню продуктивності $N_f \approx 25\%$ і ефективності використання матеріалу, що наноситься, $\gamma_{max}^f \approx 40\%$ при частоті пульсацій 65 Гц за рахунок зниження впливу розпилювального потоку на ступінь окиснення матеріалу і раціонального використання енергії дуги.

Показано, що залишкові напруження в напиленому газотермічному покритті розподіляються нерівномірно за товщиною і мають максимальне значення у переходній зоні. Із пошаровим зростанням товщини покриття, величина напруження зростає непропорційно, сповільнюючи зростання, однак сумарна усадочна сила у шарі і, відповідно, рівень напружень у переходній зоні, безперервно зростають.

Застосування пульсуючого розпилювального потоку впливає на рівень залишкових напружень: має місце зниження величини прогину напилених зразків. Найбільше зниження фіксується при оптимальних значеннях пульсацій розпилювального потоку (65...75) Гц, коли знижується рівень окиснення матеріалу дротів-електродів і, відповідно, кількість оксидів у покритті.

У сьомому розділі представлено принципову схему конструкції пульсатора для промислового застосування, зовнішній вигляд комплексної установки для забезпечення пульсуючого розпилювального струменя при дуговому нанесенні покриттів.

Наведені результати використання запропонованого обладнання на підприємствах – ВАТ «ПСК ЕвроСтройПроект» (м. Маріуполь) та ПАТ «Запоріжвогнетрив» (м. Запоріжжя).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові і практичні положення, висновки дисертаційної роботи в цілому достатньо обґрунтовані. Це обумовлено застосованими сучасними методами та методиками дослідження: електронна мікроскопія, вимірювання мікротвердості; випробування на абразивний знос; методи тіньової фотографії прозорого розпилювального

повітряного потоку у поляризованому промені світла; математичне моделювання розрахунку конструктивних параметрів додаткового елементу (пульсатора), математичні методи обробки даних з використанням програмних засобів, математичних пакетів Microsoft Excel, MathCad, Ansys-ED, заснованих на чисельних рішеннях.

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів і висновків підкріплюється використанням при аналізі результатів досліджень фундаментальних положень теорії процесів зварювання, загальної та фізичної хімії, фізики, газодинаміки.

Наукові положення і висновки дисертаційної роботи є результатом аналізу даних, отриманих у ході натурних та чисельних експериментів.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечена використанням сучасних та апробованих методик експериментального дослідження, методів обробки отриманої первинної інформації, обговоренням основних результатів на представницьких наукових конференціях.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у наступному:

- На основі теоретичного аналізу і проведених практичних досліджень вперше обґрунтовано метод електродугового нанесення покриттів з використанням пульсуючої подачі повітря в зону плавлення електродів задля зниження негативного впливу кисню розпилювального повітря на хімічний склад і властивості покриттів, за рахунок наявності часу для накопичення рідкого металу на електродах під дією теплової енергії електричної дуги і періодичності відділення рідкого металу з торців електродів.

- З урахуванням теорії взаємодії газового потоку з твердими суцільними тілами, зокрема закономірностей обтікання перешкод і наявності зони завихрень за твердим тілом, внесені коригування в комплексну схему розподілу сил при електродуговому напиленні, з визначенням зони завихрень потоку при обтіканні дротів-електродів та введенням у схему додаткової сили, що направлена на відділення рідкого металу з їх торців.

- З урахуванням теоретичних та практичних досліджень взаємодії розпилювального газового потоку з твердими електродами, що розпилюються, розроблена і використана для розрахунків математична модель плавлення, формування і відокремлення рідкого металу з торців електродів у вигляді сферичної і напівеліпсоїдної форми при використанні пульсуючого потоку розпилювального повітря,

встановлено оптимальні співвідношення сил, діючих на рідкий метал при наявності пульсацій.

- Вперше запропонована і розроблена програма розрахунку параметрів пульсатора, з урахуванням особливостей конструкції ротаційного клапану (діаметру вхідного та вихідного патрубку 8 мм та робочої витрати повітря $6 \text{ м}^3/\text{хв.}$), що дозволяють розробити оптимальну конструкцію пульсатора задля експериментального та промислового використання.

- Вперше представлено методологію розрахунку зміни витрат розпилюваного повітря, що контактує з рідким металом електродів, з урахуванням законів газодинаміки щодо протікання газу через круглі отвори (сопло), яка дозволяє встановити що із ростом частоти пульсацій до (60...80) Гц зменшується витрата розпилюваного повітря на (35...40) %.

- На базі практичних досліджень представлено рівняння розрахунку маси кисню розпилюваного повітря, контактуючого безпосередньо з рідким металом електродів, завдяки якому визначено залежності зниження маси кисню розпилюваного потоку при взаємодії з рідким металом від частоти пульсацій повітря (20...120) Гц.

- На базі теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень встановлені оптимальні значення частоти пульсацій розпилюваного повітря (60...80) Гц, які забезпечують зменшення вигорання вуглецю, марганцю, кремнію при зниженні витрат повітря і підвищення міцності зчеплення покриття з основою.

- Запропонована і використана математична модель виявлення залишкових напружень, що дозволяє встановити величину і характер розподілу напружень у покритті і базовому стрижні. За розрахунками встановлено, що впровадження пульсуючого потоку розпилюваного повітря впливає на рівень залишкових напружень, при оптимальних значеннях частоти пульсацій (65...75) Гц, коли знижується рівень окиснення легувальних елементів покриття виходить більш однорідне, має більший рівень зчеплення покриття з основою.

Отримані результати вважаю достатньо обґрунтованими, достовірними та новими.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження.

Розроблені підходи щодо підвищення якості напиленого шару за умов використання пульсуючого розпилюваного потоку, яке забезпечує зниження витрат легувальних елементів матеріалу електродів, на (20...30) % та сприяє поліпшенню технологічних властивостей покріттів.

Сформульовано рекомендації щодо використання пульсуючого розпилюваного струменя повітря, яке дозволяє підвищити

продуктивність процесу на 25 %, ефективність використання матеріалу – на 40 %.

Впроваджено технологію електродугового нанесення покріттів пульсуючим розпилювальним струменем на підприємстві ТОВ «ПСК ЕвроСтройПроект», яке є провідним виробником металоконструкцій в регіоні. Виконувалися замовлення по антикорозійній обробці металоконструкцій. За кілька місяців експлуатації досягнуте значне зниження витрат матеріалів, які наносились на вироби ($\approx 42 \%$), підвищення продуктивності процесу ($\approx 26 \%$), підвищення міцності зчеплення покріття з основою ($\approx 22 \%$). Реальний економічний ефект склав 853 тис. грн.

Підприємство «МЕТИНВЕСТ-ПРОМСЕРВІС» використало технологію електродугового напилення з пульсуючим розпилювальним струменем на базі філії ПАТ «Запоріжсталь» для відновлення і зміцнення окремих деталей комплексу обладнання для приготування суміші підприємства ПАТ «Запоріжвогнетрив». В процесі експлуатації було встановлено, що стійкість відновлених деталей збільшилася на 25 %, а річний реальний економічний ефект склав близько 315 тис. грн.

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

Розроблений з участю автора комплекс для електродугового нанесення покріття захищений патентом України.

Повнота викладення результатів в опублікованих матеріалах. Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційного дослідження опубліковані у 45 роботах, у тому числі: 21 – у спеціалізованих наукових журналах та збірниках наукових праць, з яких 9 – у наукових виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами Scopus, Index Copernicus, eLibrary (6 статей у зарубіжній виданнях); 1 монографія, 1 сертифікат міжнародної конференції, 19 тез доповідей.

В опублікованих працях у фахових наукових виданнях повністю викладено основні наукові положення дисертаційної роботи та отримані результати, а рівень та кількість публікацій відповідають вимогам до докторських дисертацій в Україні.

Автореферат ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і достатньо повно відображає актуальність, мету та задачі, основні наукові положення, практичну значущість, апробацію дисертації, її зміст по розділах, та висновки. Дисертаційна робота та автореферат оформлені у відповідності з вимогами, що ставляться до

докторських дисертацій в Україні, згідно Наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р та в Бюлєтені ВАК України, № 9-10, 2011 року.

Зауваження

При загальній позитивній характеристиці роботи є ряд зауважень:

- в літературному огляді аналізується інформація (наприклад, стор. 55-59), яка прямо не стосується предмету досліджень. У ході літературного аналізу (стор.61) наводяться ствердження, які ще мають бути обґрунтовані майбутніми дослідженнями («пульсуючий потік поліпшить якість»);
- висновки по розд. 1 дещо тривіальні та загальновідомі. Із наведених формулювань прямо не випливають задачі дослідження, які представлені у тексті далі. Не простежується прямого зв'язку застосування пульсуючого розпилювального потоку із ресурсо- та енергозбереженням самого процесу створення покриття, бо зміна режиму споживання стисненого повітря у загальному випадку не призводить до зміни режиму його генерації;
- у другому розділі роботи продовжується огляд літератури (стор. 103-112), тому загальний об'єм літературного огляду становить (25...29) % об'єму основної частини (навіть без урахування продовження літературного огляду практично у кожній наступній главі основної частини дисертації), при рекомендованих 20 %; параграф 2.6 другої глави дисертації не відповідає задачам, які були поставлені у роботі і не має відношення до теми роботи;
- із тексту роботи незрозуміло, на якій відстані від розпилювача встановлюється пульсатор. Це важлива інформація для розуміння реального стану потоку розпилювального повітря в зоні горіння електричної дуги, бо у трубопроводах на шляху від пульсатора до розпилювача відбувається активне згасання пульсацій через вирівнювання тиску в потоці; результати розрахункового дослідження впливу форми отвору пульсатора на форму імпульсу тиску (параграф 3.2) на мою думку не мають практичного значення, бо у міру просування згущень тиску вздовж трубопроводу з високою ймовірністю відбувається деформація профілю імпульсу та згладжується амплітуда імпульсів. В зоні горіння електричної дуги мабуть у кращому випадку буде суцільний потік повітря (без пауз) із періодичними згладженими максимумами тиску;

- нестандартні методики досліджень, які застосовані у роботі, не викладені в тексті дисертації достатньо повно, що не дає змогу оцінити коректність отриманих результатів; зокрема, методика вимірювання форми імпульсів за допомогою тензодатчиків у роботі не деталізована: невідомі динамічні характеристики тензодатчиків, відстань від джерела імпульсів до датчика, місце вимірювання та ін.;
- розділ 4, стор. 158 задеклароване дослідження «кінетики зміни взаємодії кисню розпилювального струменя з рідким металом електродів». У подальшому тексті ніяких встановлених нових кінетичних залежностей не наводиться;
- у тексті розд. 4. не доведений зв'язок між масовою витратою розпилювального повітря (кисню) і ступенем окиснення металу. Враховуючи, що об'ємний вміст кисню за будь-яких умов незмінний і становить близько 21 %, вплив витрати на ступінь окиснення металу не очевидний. Якщо він таки є, потрібні доказові експерименти, які у тесті не наведені;
- не зрозумілий зв'язок частоти пульсуючого потоку повітря і частоти скидань (розділ 5): частота скидань становить більше 1000 Гц (стор. 199, 204). Між тим стверджується, що оптимальна частота пульсацій потоку становить (60...75) Гц. Така частота скидань металу по суті є відомою «струминною евакуацією» металу з дротів-електродів. Не пояснюється, що примушує рідкий метал евакууватись з торця електрода з такою неймовірною частотою. У тексті, між тим, стверджується, що евакуація розплавленого металу відбувається, коли аеродинамічна сила суттєво перевищує силу поверхневого натягу і відбувається при максимумі імпульсу повітря (стор. 209). Не простежується логічний зв'язок між частотою скидань і частотою пульсацій потоку розпилювального повітря;
- висновки за розділами 2 (пп. 1, 2 та 3), 3, 5 (пп. 1, 2, 3) не змістовні, мають анотаційний характер, не акцентована увага на нових наукових результатах досліджень, які отримані у цих розділах;
- розділ 6, параграф 6.3. Відомо, що окиснення матеріалу покриття відбувається не тільки в момент евакуації розплавленого металу, але й в процесі польоту частинок та на поверхні основи у ході формування покриття. Якщо твердження автора, що (85...90) % кисню поглинається матеріалом у зоні горіння дуги, вірне, важливим було б надати прямі експериментальні докази того, що при розпиленні пульсуючим

струменем повітря цей відсоток зменшується саме на цьому етапі. Посилання на зменшення ефективної площини контакту розплавленого металу з повітрям у разі його примусової евакуації не зовсім переконливе, бо разом зі зменшенням площини контакту через зменшення маси порції накопиченого металу, одночасно збільшується частота актів евакуації порівняно з традиційним процесом.

Зроблені зауваження частково впливають на характеристику роботи, проте не впливають на загальну її позитивну оцінку.

Вважаю, що дисертаційна робота Захарової Ірини В'ячеславівни «Теоретичні і технологічні основи ресурсо- та енергозбереження при дуговому напиленні з використанням пульсуючого розпилювального потоку повітря», що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 - “Зварювання та споріднені процеси і технології”, є завершеною працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати. Робота задовільняє вимоги до докторських дисертацій згідно п. 9, 10 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р., а її автор, Захарова Ірина В'ячеславівна, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за обраною спеціальністю.

Офіційний опонент

Професор кафедри смарт технологій з'єднань та інженерії поверхні
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
доктор технічних наук, доцент

Пашенко В. М.

Підпис д.т.н. професора кафедри
смарт технологій з'єднань та інженерії поверхні
Пашенко В.М. засвідчує

Учений секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського



Холявко В. В.

