

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ АДИТИВНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ВІДНОВЛЕНИХ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

Дніпровський державний технічний університет

Анотація

У роботі представлено результати експериментального дослідження параметрів гібридного адитивного наплавлення із застосуванням подачі зварювального дроту та TIG-джерела тепла для відновлення деталей машин складної геометрії. Основна увага приділена впливу технологічних режимів на формування мікроструктури, мікротвердості та зносостійкості наплавленого шару. Встановлено оптимальні умови наплавлення, що забезпечують зменшення питомого зношування до 28% порівняно з не оптимізованими режимами. Роботизоване керування процесом дозволило досягти високої точності формування функціонального шару та стабільності якості. Отримані результати мають прикладне значення в контексті розвитку сучасних технологій відновлення та продовження ресурсу експлуатації транспортного машинобудування.

Ключові слова: гібридне адитивне наплавлення, TIG-зварювання, подача дроту, зносостійкість, машинобудування

У сучасному машинобудуванні та транспортному секторі спостерігається зростання попиту на ефективні технології відновлення деталей зі складною геометрією, особливо в умовах інтенсивної експлуатації та обмеженого ресурсу металоконструкцій. Одним із перспективних методів відновлення є гібридне адитивне наплавлення, яке поєднує подачу зварювального дроту з розплавленням його окремим джерелом тепла на основі TIG-процесу. Такий підхід дозволяє локалізувати тепловий вплив і отримати наплавлений шар із прогнозованими властивостями.

Технологічна реалізація наплавлення здійснювалася за допомогою промислового роботизованого комплексу, що забезпечує точність позиціонування пальника, контроль параметрів зварювання та повторюваність траєкторії. Об'єктом дослідження були сталеві деталі з низьколегованих конструкційних сталей типу 40X, які є типовими для транспортних вузлів, що зазнають циклічних механічних навантажень.

Основними змінними у дослідженні виступали: струм наплавлення, швидкість подачі дроту, швидкість руху пальника, а також інтервал часу між нанесенням наступних шарів. Методика дослідження базувалася на плануванні експерименту з використанням центрально-композиційного плану, що дозволило отримати математичні моделі залежності показників якості наплавленого шару від основних параметрів процесу.

Оцінювання якості здійснювалося за такими критеріями, як мікротвердість, мікроструктурна однорідність (оптична мікроскопія), глибина зони термічного впливу, а також зносостійкість за результатами випробувань на тертя методом «шпилька-диск» згідно з ASTM G99. Аналіз результатів показав, що найбільш суттєвий вплив на формування однорідної структури і підвищення мікротвердості мали параметри теплового навантаження: зварювальний струм і швидкість переміщення пальника.

Оптимальний режим, зафіксований під час експериментів, включав струм у діапазоні 110...120 А, подачу дроту зі швидкістю 2,8...3,2 мм/с та швидкість переміщення пальника 5...7 мм/с. За таких умов формувалася рівномірний шар з дрібнозернистою мартенситно-феритною структурою, яка забезпечувала підвищену твердість і зносостійкість.

Результати структурного аналізу показали, що правильний вибір часу між шарами (12...18 с) дозволяє стабілізувати тепловий режим і зменшити градієнти температури, що, в свою чергу, знижує ризик утворення мікротріщин та внутрішніх напружень. Мікроструктурні дослідження підтвердили відсутність пористості та макродефектів за умови дотримання зазначених параметрів.

У випробуваннях на знос шарів, отриманих в оптимізованих умовах, спостерігалось зменшення коефіцієнта тертя та зниження питомого зношування в середньому на 28% у порівнянні з наплавленням без оптимізації. Це свідчить про підвищення опору до абразивної дії та локального пластичного деформування.

Застосування роботизованого керування забезпечило точне відтворення наплавлення на складних поверхнях та можливість формування функціональних профілів із постійною товщиною шару. Це має особливе значення для деталей, які піддаються високим динамічним навантаженням, наприклад у вузлах трансмісій або гідравлічних систем.

Узагальнені результати свідчать, що впровадження технології гібридного наплавлення у відновлювальні процеси дозволяє суттєво підвищити надійність машинобудівних компонентів без необхідності їх повної заміни. Особливо перспективним цей підхід є для підприємств транспортного машинобудування, де питання довговічності деталей безпосередньо пов'язані з безпекою експлуатації.

Окремої уваги заслуговує потенціал розширення функціоналу обладнання за рахунок інтеграції систем термографії, сенсорного контролю шару в реальному часі та автоматичної адаптації параметрів наплавлення. Таке рішення дозволяє перейти від жорстко заданих режимів до умовно-інтелектуального керування процесом.

З технічної точки зору, оптимізація процесу наплавлення забезпечує не лише підвищення ресурсу, але й скорочення витрат на ремонтні роботи, зниження металовитрат та зменшення енергетичних втрат. Зменшення обсягів браку та стабілізація результату роблять метод придатним для серійного застосування.

Отримані результати мають прикладне значення для створення гнучких виробничих систем. Застосування таких підходів дозволяє реалізувати концепції відновлення деталей на місці експлуатації, що особливо важливо для обслуговування важкодоступних транспортних об'єктів.

Таким чином, дослідження доводить доцільність та ефективність застосування гібридного наплавлення для відновлення деталей складної форми з підвищеними вимогами до зносостійкості. У подальших дослідженнях доцільним є розширення підходу на інші типи матеріалів та аналіз впливу складних циклічних навантажень на довговічність отриманих шарів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Molochkov D., Kulykovskiy R., Brykov M., Hesse O. (2023). The influence of surface irregularities on the mechanical properties of thin-walled wire and arc additively manufactured parts. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 10(2), pp. A10–A17, doi: 10.21272/jes.2023.10(2).a2
2. Laghi, V., Palermo, M., Gasparini, G., Girelli, V. A., Trombetti, T. (2021). On the influence of the geometrical irregularities in the mechanical response of wire-and-arc additively manufactured planar elements. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 178, 106490. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106490>
3. Nemani, A. V., Ghaffari, M., Nasiri, A. (2020). Comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of shipbuilding steel plates fabricated by conventional rolling versus wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, Vol. 32, 101086. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101086>.
4. Д Молочков; П Куликовський; Н Фурманова. Визначення оптимальних параметрів процесу WAAM на основі технології cmt з використанням низьковуглецевої нелегованої сталі. *Інноваційні матеріали та технології в металургії та машинобудуванні*, 1(2021) с. 62-68.

Шевцов Віктор Борисович, аспірант, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське.

Макаренко Микола Вікторович, аспірант, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське.

Носов Денис Геннадійович, к.т.н., доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, nosov_dstu@ukr.net

OPTIMIZATION OF ADDITIVE CLADDING PARAMETERS TO ENHANCE WEAR RESISTANCE OF RECONDITIONED COMPONENTS WITH COMPLEX GEOMETRY

Abstract

The paper presents the results of an experimental study on the parameters of hybrid additive surfacing using welding wire feed and TIG heat source for the restoration of machine parts with complex geometry. The main focus is on the impact of technological parameters on the formation of microstructure, microhardness, and wear resistance of the deposited layer. Optimal surfacing conditions have been determined, resulting in a reduction of specific wear by up to 28% compared to non-optimized regimes. Robotic process control enabled high precision in the formation of the functional layer and stability in quality. The obtained results have practical significance in the context of the development of modern restoration technologies and extending the service life of transport machinery.

Keywords: Hybrid additive surfacing, TIG welding, wire feed, wear resistance, mechanical engineering

Makarenko Mykola, postgraduate student, Dniprovsky State Technical University, Kamianske,
Shevtsov Viktor, postgraduate student, Dniprovsky State Technical University, Kamianske,
Nosov Denis, Ph.D., Associate Professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske,
nosov_dstu@ukr.net