

УДК 621.791

**В. Коржик<sup>1,2</sup>, д.т.н, член-кор. НАНУ, В. Квасницький<sup>2,3</sup>, д.т.н, проф., А. Гринюк<sup>1,4</sup>, к.т.н, А. Перепічай<sup>3</sup>, к.т.н, Є. Ляшенко<sup>2</sup>, асп., І. Лагодзінський<sup>3</sup>, асп., С. Пелешенко<sup>3</sup>, асп., В. Буріка<sup>3</sup>, пров. інж.**

<sup>1</sup> Китайсько-Український інститут зварювання ім. Є.О. Патона Академії наук провінції Гуандун, Гуандунська ключова лабораторія передових технологій зварювання, Гуанчжоу, Китай

<sup>2</sup> Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна

<sup>3</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

<sup>4</sup> Науково-дослідний інститут імені Є.О. Патона в провінції Чжецзян, Чжецзян, Китай

## **ВПЛИВ СПОСОБІВ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА ФОРМУВАННЯ ШАРІВ ТА СТРУКТУРУ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ПРИ АДИТИВНОМУ СИНТЕЗІ ВИРОБІВ ЗІ СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ**

**V. Korzhyk<sup>1,2</sup>, Dr., Corresponding Member of the NAS of Ukraine, V. Kvasnytskyi<sup>2,3</sup>, Dr., Prof., A. Grynyuk<sup>1,4</sup>, Ph.D., A. Perepichay<sup>3</sup>, Ph.D, Y. Illiashenko<sup>2</sup>, Ph.D. student, S. Peleshenko<sup>3</sup>, Ph.D. student, I. Lahodzynskyi, Ph.D. student, V. Burika<sup>3</sup>, lead.eng.**

<sup>1</sup>China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding of the Guangdong Academy of Sciences. Guangdong Key Laboratory of Advanced Welding Technologies, Guangzhou, China

<sup>2</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. Kyiv, Ukraine.

<sup>3</sup>NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

<sup>4</sup> E.O. Paton Scientific Research Institute in Zhejiang Province, Zhejiang, China

## **INFLUENCE OF ARC CLADDING METHODS ON THE FORMATION OF LAYERS AND STRUCTURE OF THE DEPOSITED METAL IN THE ADDITIVE SYNTHESIS OF PRODUCTS FROM STEELS AND ALLOYS**

**Abstract.** The results of studies on the influence of methods and conditions of layer-by-layer cladding with a fusible electrode in a protective gas environment on the geometric characteristics and structure of the metal in the additive synthesis of spatial products from ferrous and non-ferrous metals are considered. On the basis of metallographic studies and computer simulation results, the influence of surfacing methods on the tendency to crack formation during surfacing of copper-based alloys was established.

З розвитком адитивних WAAM технологій виникає проблема забезпечення стабільності якості просторових виробів. Застосування методів дугового зварювання, зокрема з короткими замиканнями (Cold Metal Transfer – CMT) та імпульснодугового зварювання (Pulse процес) дозволяє суттєво розширити номенклатуру використовуваних матеріалів за рахунок мінімізації тепловкладення та регулювання термічного циклу наплавлення. При цьому забезпечується значна продуктивність процесу наплавлення завдяки зменшенню частки матеріалу, що йде на угар та розбризкування.

Важливим питанням при використанні дугових способів адитивного виробництва є зменшення ділових відходів після механічної обробки виготовленої деталі чи виробу, на що безпосередньо впливає геометрична нерівномірність отриманої поверхні синтезованого об'ємного тіла. Тому дослідження закономірностей впливу способу та режимів наплавлення, складу захисного газового середовища на геометричні характеристики сформованих шарів, їх структуру та схильність до утворення дефектів є актуальним.

Дослідження щодо формоутворення наплавлених шарів виконані із застосуванням в якості присадкових матеріалів дротів сталі ER70S-6 (Св-08Г2С) та кремнієвої бронзи ERCuSi-A (БрКМц3) діаметром 1,2 мм. В якості захисного газового середовища використовували суміші газів двох марок: M21 (82 %Ar + 18 %CO<sub>2</sub>) і M11 (98 %Ar + 2 %CO<sub>2</sub>) для сталі та чистого аргону для наплавлення кольорових сплавів. В якості зварювального джерела живлення використане джерело зварювального струму FroniusTransPuls Synergic 2700 з підтримкою CMT та Pulse наплавлення. Для зіставлення фактичних результатів та визначення основних залежностей швидкості зварювання та подачі присадних дротів встановлені на рівні  $V_H = 600$  мм/хв та  $V_{под} = 3,5$  м/хв відповідно.

Аналіз результатів експериментальних досліджень свідчить про вплив складу газових сумішей на формоутворення швів при багатопохідному наплавленні. Зокрема застосування газової суміші з 2% вуглекислого газу призводить до збільшення висоти кожного наплавленого шару, що можна чітко спостерігати у вигляді збільшення загальної висоти готового зразка (рис. 1). При цьому ширина валиків суттєво не змінювалась. При використанні методу Pulse досягнуті практично ідентичні результати, окрім помітної особливості у вигляді значно меншого розбризкування металу у процесі наплавлення з використанням захисної суміші M11 (2% вуглекислого газу).

Встановлено, що ширина наплавлених CMT способом шарів менша порівняно з Pulse (рис. 2). Суттєвого впливу складу захисного газового середовища на ширину шарів не виявлено. Висота шарів залежить від складу захисного газу, що обумовлено збільшеними втратами металу на розбризкування при використанні сумішей з високим вмістом CO<sub>2</sub>.

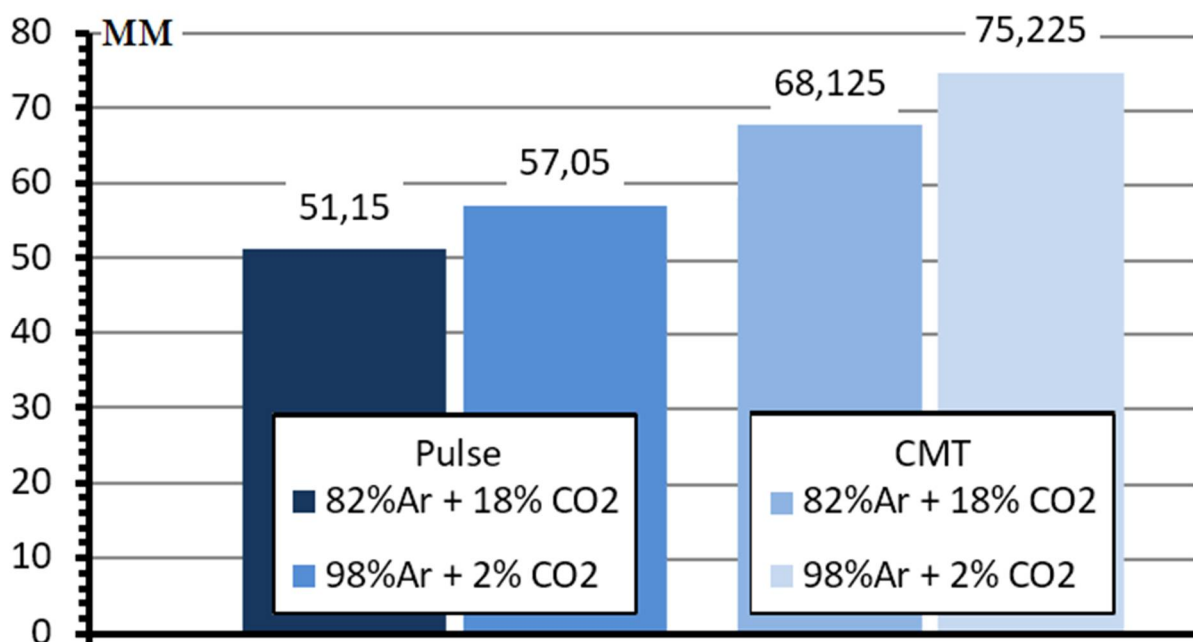


Рис. 1. Загальна висота отриманих зразків (Св-08Г2С)

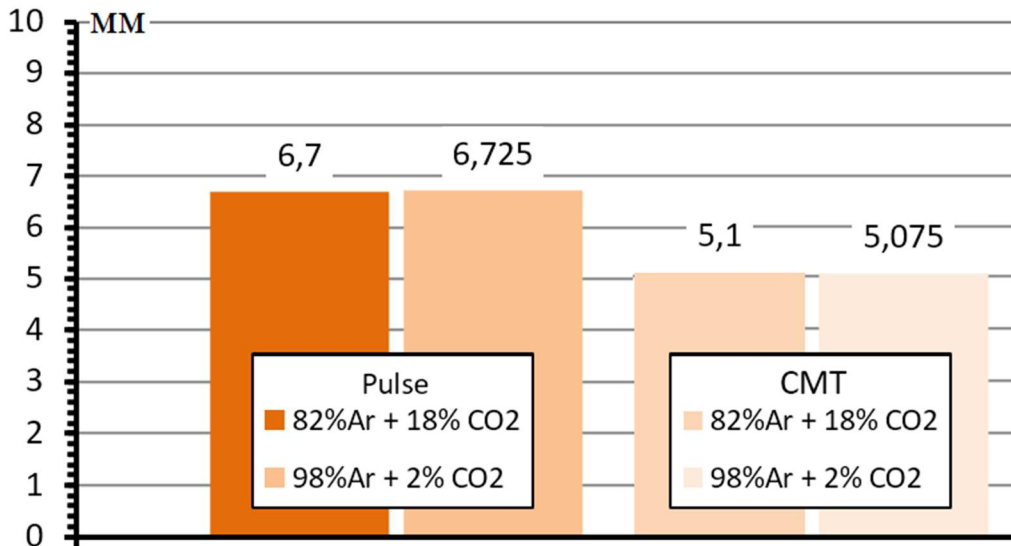


Рис. 2. Загальна ширина отриманих зразків (Св-08Г2С)

Результати металографічних досліджень наплавленого металу свідчать про наявність у металі шва дрібних неметалевих включень округлої форми. Встановлено, що дані включення є оксидами та силікатами, які досить рівномірно розподілені по всьому перерізу. Структура металу є типовою для багатошарового наплавлення. Лише в останньому наплавленому шарі спостерігається стовпчаста структура литого металу, яка вказує на напрямок кристалізації з рідкого стану.

Перехідна зона складається з металу зі зміненою структурою (зона перекриття) з фрагментарними залишками орієнтованої стовпчастої структури, яка виникла в результаті впливу термічного циклу від наплавлення наступних шарів. Таким чином, стовпчаста структура наплавленого металу порушується, утворюючи дезорієнтовану дрібнозернисту структуру. Чіткі межі між шарами відсутні у всіх варіантах наплавлення. Така структура може мати підвищену стійкість до руйнування.

Найбільше значення твердості металу характерне для отриманих наплавленням СМТ методом зразків при застосуванні захисної газової суміші М11 (98 % Ar + 2 % CO<sub>2</sub>).

Результати досліджень по наплавленню кремнієвої бронзи свідчать про аналогічний до сталі вплив способу наплавлення (СМТ/Рulse) на геометричні розміри наплавлених шарів. При наплавленні з використанням методу СМТ висота шарів майже на 25% більша у порівнянні з методом Рulse. При цьому прослідковується зменшення ширини валика на 12%.

У пошарово наплавленому методом Рulse металі зразка після досягнення 20-го шару спостерігається виникнення тріщин, що перетинають зразок перпендикулярно напрямку наплавлення. Подальше наплавлення шарів відзначалось повторним виникненням нових тріщин.

Скінченно-елементне моделювання напружено-деформованого стану при пошаровому наплавленні кремнієвої бронзи показало, що причиною виникнення та росту поперечних тріщин у наплавленому металі під час формування кінцевих шарів є високий рівень поздовжніх напружень розтягу. Встановлено, що у процесі багаторазового нагріву, рівень поздовжніх напружень розтягу досягає межі міцності бронзи (CuSi3).