

ВПЛИВ МЕТОДІВ GMAW І PAW АДИТИВНОГО ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ТА СКЛАДУ ЗАХИСНОГО ГАЗУ НА ГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХОНЬ І СТРУКТУРУ МЕТАЛУ ВИРОБІВ

В.В. Квасницький, І.М. Лагодзінський

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37.
E-mail: kvas69@ukr.net

З розвитком WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) технологій постає необхідність забезпечення стабільності характеристик якості просторових виробів та бажано отримати на виході поверхню з найменшою геометричною нерівномірністю. Дугове наплавлення, зокрема з короткими замиканнями (Cold Metal Transfer – CMT), та імпульсно-дугове наплавлення (Pulse процес) дозволяють підвищити контроль поведінки розплаву зварювальної ванни, зменшити витрати матеріалу на розбризування та угар, що забезпечує збільшення продуктивності процесу. Разом із цим, актуальними є дослідження щодо закономірностей впливу методів дугового наплавлення, зокрема технологій CMT, Pulse та PAW, і складу захисного газового середовища на геометричні характеристики сформованих шарів, структуру наплавленого металу та схильність до утворення дефектів. Аналіз геометричних характеристик зразків свідчить, що склад захисної газової суміші має суттєвий вплив на висоту наплавлених шарів незалежно від методу наплавлення (CMT/Pulse). Так, для суміші M11 висота окремих валиків збільшується на 10,4...11,7 % у порівнянні з використанням суміші M21. Застосування імпульсного струму призводить до збільшення на 10...11 % ширини валиків у порівнянні з CMT процесом. Металографічні дослідження свідчать про типову для багат шарового наплавлення структуру металу виробів. Чіткої межі між окремими шарами наплавленого металу не виявлено. Бібліогр. 18, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: WAAM, GMAW, Cold Metal Transfer, плазма, адитивні технології, 09Г2С, пошарове наплавлення, захисна газова суміш

Вступ. Стрімкий розвиток промисловості вимагає оптимізації існуючих технологічних процесів виготовлення не тільки одиничних виробів (прототипів, моделей), але й серійних виробів. Проте з точки зору серійного виробництва виникає проблема співвідношення вартості сировини, витраченої на побудову виробу, та вартості кінцевого виробу. Тобто кількість відходів, що залишаються після фінішної обробки виробу, суттєво впливає на вартість кожної одиниці готової продукції. Іншими словами, необхідно зменшити коефіцієнт BTF – Buy to Fly, який використовується в аерокосмічній промисловості, що забезпечить зменшення кількості відходів після чистової обробки [1].

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) – різновид технології адитивного виробництва, що заснований на використанні дугових джерел тепла та компактного присадного матеріалу [2]. Процеси адитивного дугового виробництва з використанням електричної дуги (WAAM) засновані на принципі пошарового наплавлення валиків. На відміну від процесу зварювання, де головну роль відіграє глибина проплавлення та заповнення розробки крайок присадним металом, при адитивних процесах навпаки намагаються отримати найменше проплавлення основи (субстрату) та переміщення металу наступного шару з попереднім.

Квасницький В.В. – <http://orcid.org/0000-0002-7756-5179>, Лагодзінський І.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7986-9440>
© В.В. Квасницький, І.М. Лагодзінський, 2023

Також намагаються досягти найбільш можливої висоти при побудові кожного окремого валика.

Суттєвого розвитку набули технології Gas Metal Arc Welding (GMAW) наплавлення плавким електродом у середовищі захисних газів. Цей спосіб передбачає безперервне подавання та плавлення дроту суцільного перерізу в атмосфері захисного газу. Таким чином, наплавлення здійснюється за допомогою нагрівання електричною дугою та безперервного плавлення присадного дроту, який наплавляється на поверхню основи. Зварювальна ванна та дуга існують в атмосфері активних чи інертних захисних газів. Процес дозволяє в широких межах регулювати механічні властивості отриманих виробів шляхом застосування для наплавлення різноманітної номенклатури зварювальних матеріалів. Основними перевагами використання GMAW технологій при адитивному виробництві є: достатньо висока точність формування валиків при центральному (осьовому) подаванні електродного дроту; незначна кількість контрольованих параметрів режиму наплавлення, що сприяє простоті керування процесом та його автоматизації; простота, доступність та відносно низька вартість обладнання.

Проте згадані процеси мають також низку недоліків: відносно велике тепловкладення у порівнянні з висококонцентрованими джерелами тепла

(лазер, електронний промінь); наявність значного розбризкування металу в процесі наплавлення при використанні типових газів або методів [3]. Для зменшення тепловкладення в попередньо сформовані шари успішно застосовуються технологія Cold Metal Transfer (CMT) та імпульснодугові (Pulse) процеси [4]. Регулювання тепловкладення дозволяє значно розширити номенклатуру матеріалів, придатних для використання GMAW технологій.

Відомо, що для GMAW процесів характерна досить значна нерівномірність поверхні, що отримана пошаровим формуванням [5]. На геометричну точність і нерівномірність поверхні наплавлених шарів суттєвий вплив мають режими наплавлення, зокрема величина струму, напруга дуги, швидкість подачі присадного дроту та переміщення пальника [6, 7]. Також необхідно враховувати напрямок траєкторії наплавлення при генеруванні наступних шарів [8]. Окремим важливим параметром впливу є склад захисної газової суміші оскільки відомо, що наявність кисню змінює значення поверхневого натягу розплаву металу зварювальної ванни.

Основна роль газових сумішей при GMAW процесах полягає у захисті розплаву металу зварювальної ванни від взаємодії з газами навколишнього середовища. Також склад захисного газу суттєво впливає на ступінь іонізації дугового проміжку, і, як наслідок, на стабільність горіння дуги. Автори роботи [9] підтвердили вплив складу захисного газу на процес перенесення металу через зварювальну дугу та на геометричну форму наплавлених валиків. Питання впливу компонентів захисних газових сумішей на формування та нерівномірність поверхні при адитивному вирощуванні виробів були розглянуті в роботі [10] щодо виробів з низьковуглецевої сталі типу 09Г2С. Автори зазначають, що суттєвий вплив на нерівномірність поверхні має також теплопровідність кожного конкретного газу в суміші. Так, гази з найменшим значенням величини теплопровідності, зокрема Ar, сприяють меншому тепловкладенню та, як наслідок, розтіканню металу зварювальної ванни. При застосуванні CMT процесу, досягається зменшення відхилення від прямолінійності утворюючої валиків у вертикальному напрямку та зменшуються втрати присадного матеріалу на розбризкування, що підвищує коефіцієнт використання матеріалу. Автори роботи [11] також підтвердили, що гази, які мають більшу теплопровідність, зокрема He, при додаванні до газових сумішей складу Ar-CO₂ хоч і призводять до зменшення радіуса дугової плями, що сприяє формуванню вузькіших валиків, також викликають збільшення глибини проплавлення попередньо сформованих шарів. У результаті спостерігається значне відхилення геометричної форми сформованих стінок виробів при послідовному наплавленні наступних шарів. З точки зору ефективного використан-

ня матеріалу цей вплив має негативний характер, оскільки при фінішній механічній обробці збільшується кількість відходів металу. Окрім впливу на геометричну форму валиків, різні газові суміші суттєво впливають на формування структури наплавленого металу. Так, у [12] автори розглянули вплив вмісту вуглекислого газу у суміші з аргоном на формування структури наплавленого металу для високоміцних сталей (міцністю до 950 МПа). Авторами визначено співвідношення вмісту голчастого та відманштеттового фериту і встановлено, що зі збільшенням концентрації CO₂ у складі захисного газу збільшується кількість відманштеттового фериту. У [13–15] за результатами власних досліджень автори підтвердили вплив складу газових сумішей на формування структури наплавленого металу. Зокрема, у [13] наведено порівняння геометричних характеристик і кількості окремих структурних складових у наплавленому металі. Важливою характеристикою є величина нерівномірності поверхні зразків, що вимагає введення необхідного припуску на обробку поверхні для отримання готового виробу. Проте при дослідженні впливу складу газових сумішей на геометричні характеристики наплавлених шарів при адитивному наплавленні, як правило, розглядають лише GMAW наплавлення або його різновид CMT процес. У літературі наявні обмежені відомості щодо впливу складу газового середовища при використанні Pulse процесу [16].

Мета роботи – встановлення закономірностей впливу GMAW-CMT/Pulse та PAW способів дугового наплавлення та складу захисного газового середовища на геометричні характеристики поверхонь виробів з низьковуглецевої сталі 09Г2С, структуру наплавленого металу та схильність до утворення дефектів.

Для досягнення мети необхідно було виконати наступні завдання:

- проаналізувати наявні в літературі відомості щодо особливостей формування геометричної форми та структури металу, схильність до утворення дефектів стінок виробів, отриманих із застосуванням WAAM технологій адитивного виробництва з нагріванням компактного присадного матеріалу дуговими джерелами тепла;
- отримати зразки пошарово наплавленого металу із застосуванням GMAW-CMT/Pulse та PAW способів дугового наплавлення в середовищі активних газових сумішей M11 та M21 та дроту суцільного перетину з низьковуглецевої сталі 09Г2С;
- дослідити геометричні характеристики поверхонь отриманих зразків;
- дослідити особливості структурної будови металу зразків, отриманих GMAW-CMT/Pulse та PAW способами дугового наплавлення, та схильність до утворення дефектів.

Методика експериментів. У дослідженнях з GMAW та PAW наплавлення використано експериментальний стенд для наплавлення валиків прямолінійної форми (рис. 1, а). У якості джерела живлення використовували установку Fronius TransPulse Synergic 2700 у поєднанні зі зварювальним пальником PullMig CMT MHP 400i. Для плазмового наплавлення використано спеціалізований плазмовий пальник, розроблений компанією ТОВ «НВЦ «Плазер» (рис. 1, б), у поєднанні з джерелом живлення Tetrix 421 та модулем підпалу чергової дуги Fronius. Конструкція пальника забезпечує бокову подачу присадного дроту, таким чином реалізується процес PAW-CW (Cold Wire) наплавлення. подача присадного дроту забезпечувалась окремим блоком подавання з синхронним пуском. Наплавлення зразків GMAW способами методами Pulse та CMT здійснювали шляхом послідовного формування окремих шарів у зворотньо-поступальному напрямку. Для PAW способу переміщення для формування кожного нового шару є одностороннім. Діаметр електродного дроту для усіх використаних марок присадних дротів залишався незмінним і складав $d_e = 1,2$ мм, довжина сформованих стінок ~ 100 мм, кількість шарів – 50.

Наплавлення шарів методами GMAW-CMT/Pulse проводили на пластинах зі сталі E235-C (Ст3сп) завтовшки 10 мм. Пошарове наплавлен-

ня виконували електродним дротом суцільного перерізу типу G3Si1 (Св-09Г2С). Для визначення впливу складу газового захисного середовища на геометричні характеристики наплавлених шарів та формування структури наплавленого металу при адитивному напавленні низьковуглецевих сталей застосовано газові суміші M21 (Ar 82 % + CO₂ 18 %) та M11 (Ar 98 % + CO₂ 2 %) як найрозповсюдженіші в зварювальному виробництві. Для кожної з газових сумішей виконано наплавлення трьох зразків методами CMT та Pulse.

Також було виготовлено зразки плазмово-дуговим наплавленням дроту суцільного перерізу. Застосовували метод PAW-CW (Cold Wire) наплавлення для виготовлення зразків з низьковуглецевої сталі. Зразки наплавляли на підкладки у вигляді пластин зі сталі E 235-C (Ст3сп) завтовшки 10 мм. У якості присадного матеріалу використовували дріт типу G3Si1 (Св-09Г2С). Враховуючи особливості плазмового пальника, а саме можливість окремого подавання плазموутворюючого та захисного газу, при дослідженнях в якості плазмоутворюючого газу застосовували аргон, а в якості захисного газу – суміш M11 (Ar 98 % + CO₂ 2 %). Режими пошарового наплавлення зразків наведено в табл. 1. Розрахунковим шляхом визначено погонну енергію наплавлення зразків (табл. 1)

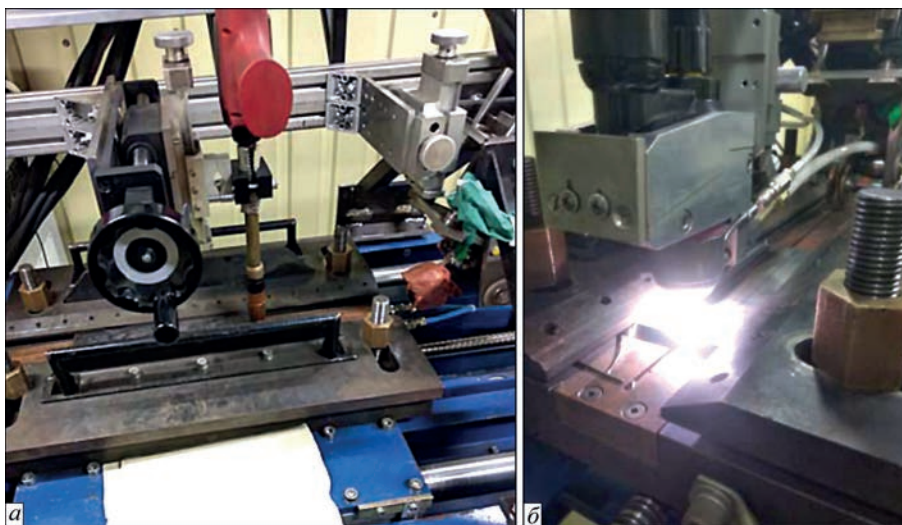


Рис. 1. Експериментальний стенд: а – навісне обладнання для GMAW наплавлення; б – плазмовий пальник для PAW-CW наплавлення

Таблиця 1. Режими пошарового дугового наплавлення зразків

Спосіб	Присадний матеріал	Захисний газ	Погонна енергія, Дж/мм	Струм, А	Напруга, В	Діаметр сопла, мм	Швидкість подачі дроту $V_{п.д.}$, м/хв	Швидкість наплавлення $V_{за}$, мм/хв	Витрати газу, л/хв
GMAW-CMT	G3Si1 (Св-09Г2С)	M21	157	131	12	16	3,5	600	15
		M11	146	133	11				
GMAW-Pulse		M21	240	120	20				
		M11	262	131	20				
PAW-CW	Ar	262	202	13	4	3,5	600	0,6	
	M11							15	

При виборі температурних умов наплавлення окремих шарів обрано стратегію міжшарового охолодження до 120 °С, запропоновану в [17]. Охолодження кожного окремого шару здійснювалось з метою уникнення надлишкового перегріву попередньо наплавлених шарів.

Після наплавлення зі сформованих стінок механічним шляхом із застосуванням змащувально-охолоджуючої рідини для уникнення перегріву та спотворення структури металу вирізали зразки для досліджень мікро- та макроструктури. Визначення структури металу зразків проводили шляхом хімічного травлення в 4 %-му спиртовому розчині азотної кислоти (HNO₃). Дослідження проводили на металографічному оптичному мікроскопі Neophot-32. Металографічне дослідження неметалевих включень в металі здійснювалось за шкалами відповідно до ГОСТ 1778-70. Визначення розміру зерна проводили шляхом порівняння зі шкалами ГОСТ 5639-82. Твердість фазових складових вимірювали за методом Віккерса за допомогою мікротвердоміру LECO M-400.

Результати досліджень та їх обговорення. Представлені результати аналізу зміни геометричних характеристик наплавлених зразків в залеж-

ності від параметрів режимів наплавлення, застосованого методу GMAW наплавлення (СМТ або Pulse) у поєднанні з різними захисними середовищами наведено на рис. 3–6. Ці залежності є досить важливими, адже вони пов'язані з кількістю матеріалу, який витрачається на чистову обробку згенерованої заготовки виробу, оскільки при адитивному наплавленні створюється форма практично готової деталі чи виробу з припуском на чистову обробку. Для оцінювання геометричних характеристик виробів обрано запропонований у роботі [10] підхід з використанням параметрів ефективної висоти та ефективної ширини стінки (рис. 2). За аналогією з триботехнікою, для оцінки геометричних характеристик утвореної поверхні виробів застосовано показник максимального значення відхилення профілю стінки з обох боків від центральної осі (рис. 2). Чим менший показник відхилення, тим більше форма заготовки наближається до форми готового виробу та вища ефективність використання матеріалу. Адже при чистовій обробці у відходи йде припуск на обробку та матеріал, що являє собою лускату поверхню наплавленого виробу.

Особливістю перебігу GMAW-СМТ процесу (металоперенос з короткими замиканнями) є фактично повне виключення явища розбризкування металу в процесі наплавлення. Однак зі зміною складу газової суміші змінюється теплопровідність газового середовища та, як наслідок, рівень тепловкладення у зварювальну ванну. Заміна захисного газу з суміші M21, де 18 % CO₂ (рис. 3, а) на M11 з 2 % CO₂ (рис. 3, б) сприяє зменшенню ефективної ширини кожного окремого наплавленого валика з 3,92 мм (для M21) до 3,68 мм (для M11). Одночасно збільшується ефективна висота стінки з 68,1 мм при суміші M21 до 75,2 мм при застосуванні суміші M11 (рис. 6). З точки зору якості утвореної поверхні (рис. 3, а, б), зміна га-

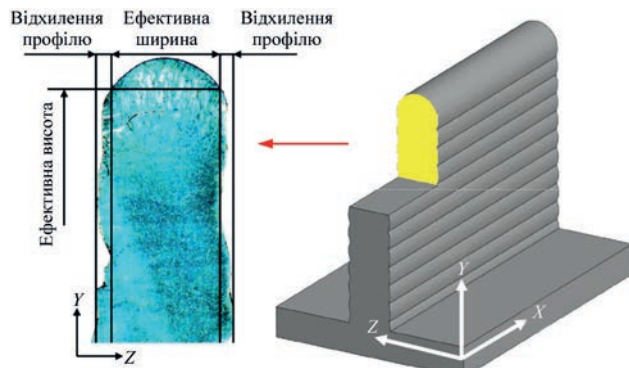


Рис. 2. Визначення параметрів ефективної висоти, ефективної товщини та максимального відхилення профілю

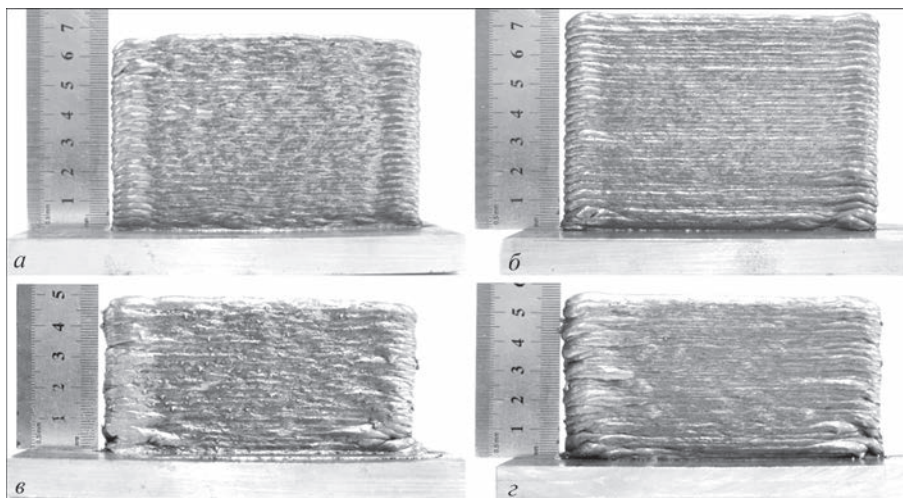


Рис. 3. Зразки з низьковуглецевої сталі 09Г2С (G3Si1), виготовлених різними методами наплавлення при застосуванні газових сумішей M21 та M11: а – GMAW-CMT, газ M21; б – GMAW-CMT, газ M11; в – GMAW-CMT, газ M21; г – GMAW-Pulse, газ M21

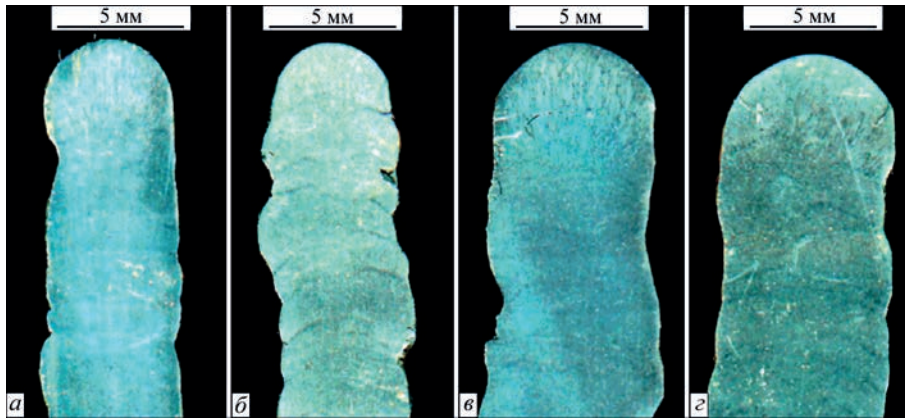


Рис. 4. Макроструктура зразків з низьковуглецевої сталі 09Г2С (G3Si1), виготовлених різними методами наплавлення при застосуванні газових сумішей M21 та M11: а – GMAW-CMT, газ M21; б – GMAW-CMT, газ M11; в – GMAW-CMT, газ M21; з – GMAW-Pulse, газ M21

зової суміші M21 на M11 призводить до суттєвого збільшення показників відхилення профілю стінки (рис. 6). Враховуючи низьку теплопровідність аргону, при зменшенні його частки в суміші з вуглекислим газом, який має більшу теплопровідність, у комбінації зі зменшеним тепловкладенням при застосуванні GMAW-CMT процесу, час існування зварювальної ванни зменшується. Це призводить до зменшення обсягу переплавленого металу попередніх шарів та нерівномірного розтікання металу зварювальної ванни з наступною кристалізацією. Такий механізм впливу теплопровідності газового середовища пояснює взаємозв'язок між ефективною висотою, ефективною шириною та відхиленням профілю стінок, що частково підтверджується результатами інших досліджень [10].

Процес пошарового формування виробів з використанням газової суміші M21 при застосуванні GMAW-Pulse процесу (рис. 3, в) супроводжується активним розбризуванням металу. Інтенсивне розбризування пояснюється наявністю значної кількості (18 %) вуглекислого газу та імпульсною подачею електричного струму [18]. Заміна захисного газового середовища на суміш M11 (рис. 3, з) суттєво зменшує розбризування в процесі наплавлення. Як наслідок, на рис. 6 можна спостерігати чітку залежність ефективною висоти стін-

ки від складу застосованої газової суміші. Ця залежність схожа з результатами отриманими при GMAW-CMT процесі наплавлення.

Цікавою є залежність зміни ефективною товщини стінки від складу газового середовища. Так, на відміну від GMAW-CMT процесу (рис. 4, а, б), в імпульсному режимі застосування суміші M11 призводить до збільшення ефективною товщини виготовленої стінки на 10...11 %. Значення ефективною ширини сягає 5,1 мм (рис. 4, з) при застосуванні суміші M11 і зменшується у порівнянні зі зразками, отриманими із застосуванням суміші M21 – 4,8 мм (рис. 4, в). Як і у випадку з ефективною

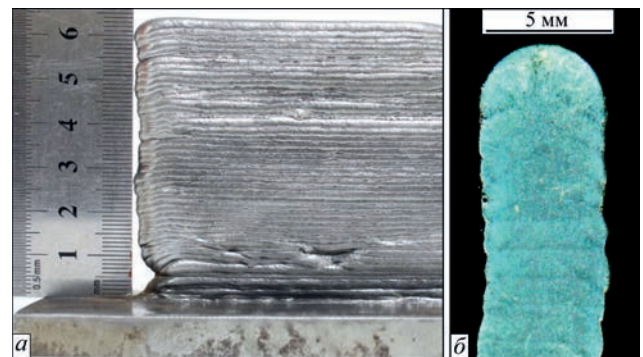


Рис. 5. Наплавлений PAW-CW способом зразок зі сталі 09Г2С (G3Si1): а – загальний вигляд бокової поверхні; б – поперечний макрошліф

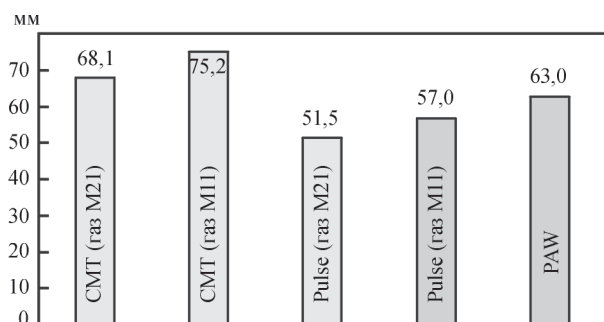
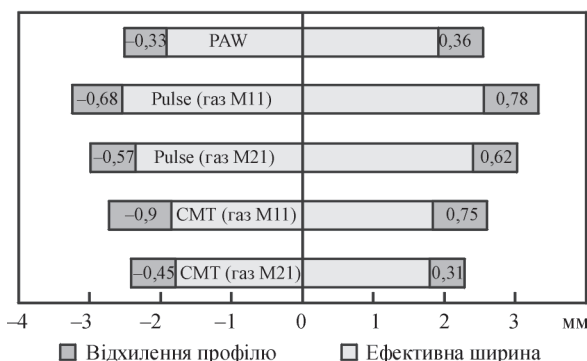


Рис. 6. Залежність ефективною товщини стінок (а) та їх ефективною висоти (б) при адитивному наплавленні сталі 09Г2С (G3Si1) GMAW-CMT/Pulse та PAW-CW методами в захисних газових сумішах M21 та M11

ною висотою, це пов'язано зі значним зменшенням втрат металу на розбризкування при зменшенні вмісту вуглекислого газу у складі газової суміші.

Зміна вмісту вуглекислого газу в суміші суттєво вплинула на значення відхилення профілю бокової поверхні стінки. Для суміші M11 та M21 відхилення профілю стінки складають 0,68...0,78 та 0,57...0,62 мм відповідно (рис. 6).

Для порівняння з GMAW-Pulse/CMT процесами виготовлено стінку PAW-CW наплавленням при незмінних параметрах швидкості зварювання ($V_{зв} = 600$ см/хв) та швидкості подачі дроту ($V_{п.д.} = 3,5$ м/хв) (рис. 5).

На рис. 6 представлено результати досліджень щодо визначення залежності ефективної товщини стінок (рис. 6, а) та ефективної висоти стінок (рис. 6, б) зразків. Аналіз отриманих результатів свідчить, що у порівнянні з GMAW процесами, стінка, виготовлена PAW-CW наплавленням, має найменший показник відхилення профілю бокової поверхні.

Мікроструктурний аналіз зразків з низьковуглецевої сталі виконували на шліфах, які вирізали з трьох окремих зон: останній наплавлений шар, перехідна зона між останнім шаром та попередніми шарами, зона попередніх переплавлених шарів.

Практично у всіх зразках виявлено дрібні неметалеві включення округлої форми (рис. 7, а, б). При металографічному дослідженні встановлено, що дані включення є оксидами та силікатами, які досить рівномірно розподілені по всьому поперечному перерізу зразків. Кількість і розмір виявлених включень менше балу № 1 (за шкалою згідно з ГОСТ 1778-70). Крім поодиноких включень спостерігаються також поодинокі ланцюжки (рис. 7, б, г) і компактні скупчення оксидних і силікатних включень (рис. 7, б, г). У зразках, отриманих

GMAW-CMT/Pulse процесами наплавлення в захисній газовій суміші M11, включення мають неправильну форму, їх склад відрізняється від складу простих хімічних сполук, зокрема оксидів та силіцидів (рис. 7, в). Їх розміри перевищують розміри оксидів і силікатів в цих зразках.

Мікроструктура металу досліджених зразків сталі 09Г2С (G3Si1) є характерною для багатошарових наплавлень – стовбчаста структура литого металу, яка вказує на направленість кристалізації із рідкого стану, спостерігається лише в останньому наплавленому шарі (рис. 8, а, г, ж, і). Найбільш дрібнодисперсна структура (рис. 8, а, б, в) наплавненого металу формується при застосуванні GMAW-CMT методу у сполученні з газовою сумішшю M21. Мікроструктура на ділянках останнього шару наплавлення являє собою виділення полігонального фериту (інколи з орієнтацією по Відманштетту) та дисперсного перліту по границях кристалітів. Бал феритного зерна відповідає №№9-10 за ГОСТ-5639-82. Частка відманштетового фериту у зразках, наплавлених GMAW-Pulse методом (рис. 8, ж, і), більша, ніж для зразків, отриманих GMAW-CMT наплавленням з однаковою газовою сумішшю. У тілі кристалітів утворюється декілька форм фериту – полідричний та дві модифікації пластинчастого – з впорядкованою та з неупорядкованою другою фазою. Між собою мікроструктура зразків відрізняється розмірами кристалітів, шириною виділень полігонального фериту по границях кристалітів та кількістю інших феритних форм, а також мікротвердістю наплавненого металу. Розмір кристалітів коливається у межах: 80...130 мкм для GMAW-Pulse методу, 60...80 мкм для GMAW-CMT з газом M21 та 80...160 мкм для GMAW-CMT методу в захисній газовій суміші M11.

Перехідна зона складається з металу зі змінною структурою (область перекриття), яка виникла в результаті теплового впливу при накладен-

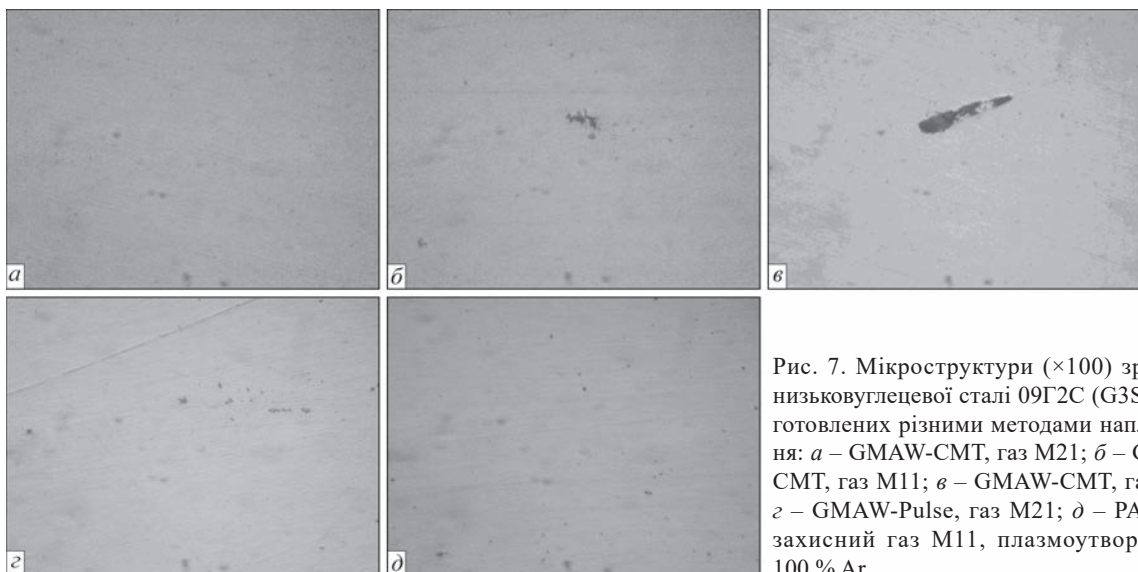


Рис. 7. Мікроструктури ($\times 100$) зразків з низьковуглецевої сталі 09Г2С (G3Si1), виготовлених різними методами наплавлення: а – GMAW-CMT, газ M21; б – GMAW-CMT, газ M11; в – GMAW-CMT, газ M21; г – GMAW-Pulse, газ M21; д – PAW-CW, захисний газ M11, плазмоутворюючий 100 % Ar

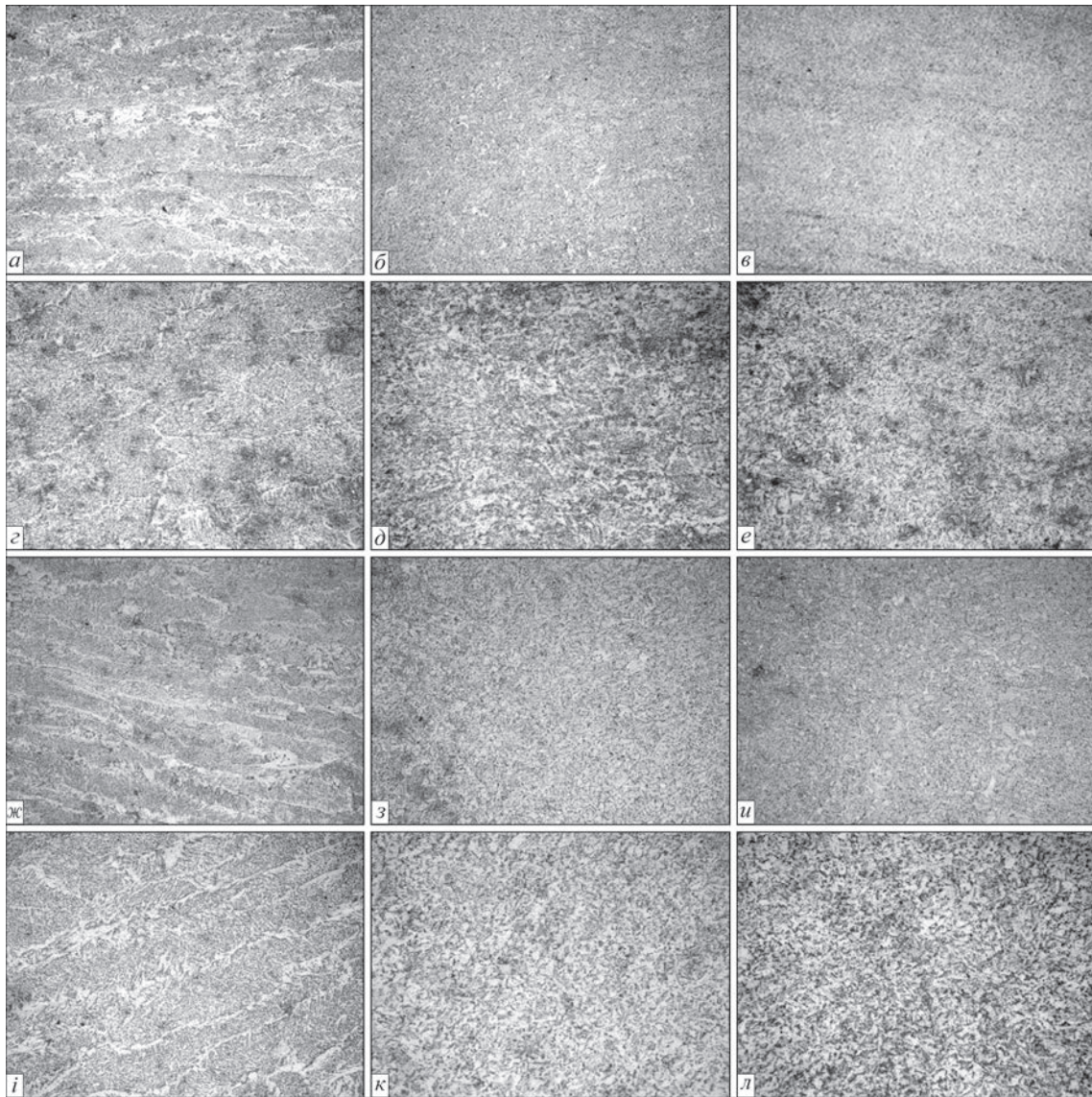


Рис. 8. Мікроструктури ($\times 800$) металу зразків, виготовлених пошаровим GMAW-CMT/Pulse наплавленням у комбінації з різними газовими сумішами: *a* – GMAW-CMT, газ M21; *б* – GMAW-CMT, газ M21; *в* – GMAW-CMT, газ M21; *г* – GMAW-CMT, газ M11; *д* – GMAW-CMT, газ M11; *е* – GMAW-CMT, газ M11; *ж* – GMAW-Pulse, газ M21; *з* – GMAW-Pulse, газ M21; *и* – GMAW-Pulse, газ M21; *і* – GMAW-Pulse, газ M21 – останній наплавлений шар; *к* – GMAW-Pulse, газ M21 – перехідна зона; *л* – GMAW-Pulse, газ M21 – попередні шари

ні кожного наступного шару. Ця зона в основному складається з фрагментарних залишків направленої стовбчастої структури (рис. 8, *б*, *д*, *з*, *к*). Структура є подрібненою, зернистою, феритно-перлітною зі значним вмістом фериту. Таким чином, у перехідній зоні порушується стовбчаста будова структури наплавленого металу, утворюється дезорієнтована дрібнозерниста структура. В усіх зразках чітко вираженої межі з'єднання шарів не спостерігається. Така структура повинна мати підвищений опір руйнуванню.

У попередніх шарах подекуди зберігається орієнтованість структури, що є характерною для литого металу (рис. 8, *в*, *е*, *и*, *л*). Мікроструктура отриманих зразків відрізняється величиною феритного зерна, у перехідній зоні та попередніх шарах бал зерна № 7-8 за ГОСТ-5639-82 для зраз-

ків, отриманих GMAW-Pulse, та № 9 для GMAW-CMT наплавлення.

Найвища мікротвердість наплавленого металу за шкалою HV1 є характерною для зразків, наплавлених методом GMAW-CMT, при застосуванні захисної газової суміші M11 (1840...2082 МПа). Мікротвердість зразків, наплавлених з імпульсною подачею зварювального струму, варіюється у межах 1618...1922 МПа.

Мікроструктура зразків наплавленого методом PAW-CW металу схожа зі структурною будовою зразків, отриманих GMAW-CMT/Pulse наплавленням. Найменша мікротвердість металу серед усіх досліджених зразків на рівні 1766...1885 МПа спостерігається при PAW-CW наплавленні. Мікроструктура останнього шару складається з масивних виділень полігонального фериту, значна частка якого має орієнтацію по Відманштетту, та

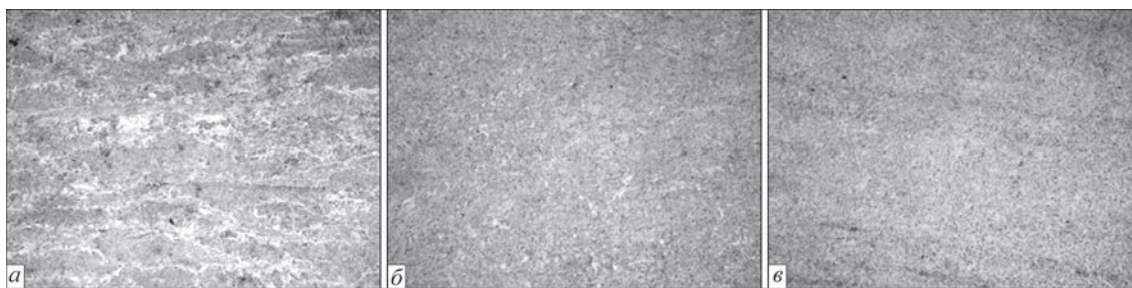


Рис. 9. Мікроструктури ($\times 800$) металу зразка, виготовленого пошаровим PAW-CW наплавленням: *a* – останній шар; *b* – перехідна зона; *c* – попередні шари

Таблиця 2. Середні значення мікротвердості наплавлених зразків, МПа

Спосіб наплавлення та склад захисної газової суміші	Останній шар		Перехідна зона	Попередній шар
	Феритна складова	Тіло кристалів	Феритна складова	Феритна складова
GMAW-CMT (82 %Ar + 18 %CO ₂)	1760	2032	1748	1602
GMAW-CMT (98 %Ar + 2 %CO ₂)	2083	2238	1895	1840
GMAW-Pulse (82 %Ar + 18 %CO ₂)	1923	2046	1740	1618
GMAW-Pulse (98 %Ar + 2 %CO ₂)	1885	2093	1785	1766
PAW-CW (захисний газ: 98 %Ar + 2 %CO ₂) (плазмотворюючий газ – 100 % Ar)	1745	1812.5	1580	1687

дисперсного перліту, розподіленого по границях кристалітів (рис. 9, *a*). Останній шар складається з дендритів подовженої форми. У перехідній зоні та попередньому шарі спостерігається майже однорідна область перекривання шарів. Структура феритно-перлітна, кількість фериту в структурі значно перевищує кількість перліту (рис. 9, *b*). У нижній частині наплавленого зразка на відстані близько 1 мм від підкладки спостерігається феритно-перлітна структура (рис. 9, *c*) з балом зерна № 9.

Твердість металу наплавлених зразків наведено в табл. 2.

Аналіз даних мікротвердості фазової складової свідчить про наявність впливу повторного проходження джерела тепла на попередньо наплавлені шари. Так, мікротвердість попередніх шарів знижується відносно останнього шару внаслідок повторного нагріву та наступного відпуску під впливом тепла наступних шарів наплавленого металу. Максимальну твердість близько 2083 МПа мають поверхневі шари наплавленого GMAW-CMT методом в суміші M11 дротом G3Si1 (09Г2С) металу.

Висновки

1. Встановлено вплив CMT та Puls методів GMAW способу наплавлення на геометричні характеристики наплавлених шарів зі сталі G3Si1 (09Г2С). Найбільшу висоту наплавлених зразків (~ 75 мм) при послідовному напавленні 50-ти шарів та мінімальну товщину стінок до 4,6 мм забезпечує GMAW-CMT наплавлення. Заміна захисної газової суміші M11 на M21 призводить до зменшення висоті стінок до 68 мм. Ефективна ширина стінок наплавленого в суміші M21 металу складає ~ 4 мм, а в суміші M11 $\sim 3,6$ мм. Заміна суміші M21 на M11 супроводжується суттєвим

збільшенням відхилення профілю – з 0,31...0,45 до 0,75...0,9 мм. Формування шарів з максимальною висотою пов’язане з меншим у порівнянні з іншими дослідженими методами тепловкладенням, що призводить до зменшення глибини проплавлення металу попередньо наплавленого шару та мінімальним розбризкуванням металу, особливо в суміші M11 з мінімальним вмістом CO₂.

2. При GMAW-Pulse напавленні сталі G3Si1 (09Г2С) висота стінок є мінімальною, а ефективна ширина досягає максимальних значень. Заміна газової суміші з M11 на M21 призводить до зменшення ефективної ширини стінок з одночасним зменшенням відхилення профілю з 0,68...0,78 до 0,57...0,62 мм. Максимальні значення відхилення профілю характерні для GMAW наплавлення при застосуванні суміші M11. Плазмове наплавлення з холодним дротом (PAW-CW) забезпечує проміжні значення висоти стінок до 63 мм та ефективну ширину $\sim 4,4$ мм. Відхилення профілю при PAW-CW напавленні є мінімальним з розглянутих варіантів і складає 0,33...0,36 мм.

3. При напавленні низьковуглецевої сталі типу G3Si1 (09Г2С) GMAW-CMT/Pulse та PAW-CW методами у всіх випадках формується щільна структура металу, в якій виявлено дисперсні неметалеві включення оксидів і силікатів округлої форми, які рівномірно розподілені по всьому перерізу зразків. Кількість і розмір виявлених включень менше балу № 1 (за шкалою згідно з ГОСТ 1778-70). На окремих ділянках спостерігаються ланцюжки і компактні скупчення включень. Структура наплавленого металу є феритно-перлітною. Останній напавлений шар має стовпчасту структуру, яка є характерною для литого металу. У перехідній зоні спостерігається дезорієнтована дрібнозерниста структура з фрагментар-

ними залишками орієнтованих стовпчастих структур, а в раніше сформованих шарах під впливом наступних циклів наплавлення формується дезорієнтована дрібнозерниста структура. В усіх зразках чітко вираженої межі з'єднання шарів не спостерігається.

4. Максимальні значення мікротвердості є характерними для останніх наплавлених шарів при всіх досліджених способах і при GMAW-CMT наплавленні в газовій суміші M11 досягають 2083...2238 МПа. Величина мікротвердості металу зменшується при переході до раніше наплавлених шарів, що пов'язано з повторною дією термічного циклу при багатопрохідному наплавленні. При плазмовому наплавленні мікротвердість є мінімальною. Для останнього шару вона складає 1745...1813 МПа, а в попередньо сформованих шарах значення мікротвердості металу зменшуються до 1580...1687 МПа.

Список літератури/References

- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. et al. (2016) Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation. *J. of Cleaner Production*, 133, 942–952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.036>
- Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M. et al. (2019) Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12(7), 1121. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12071121>
- Pan, Z., Ding, D., Wu, B. et al. (2018) Arc welding processes for additive manufacturing: A review. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 1, 3–24. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-5355-9_1
- DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S. et al. (2018) Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- Kvasnytskyi, V., Korzyk, V., Lahodzinkyi, I. et al. (2020) Creation of volumetric products using additive arc cladding with compact and powder filler materials. *IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, pp. 02SAMA16-1–02SAMA16-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309696>
- Xiong, J., Li, Y., Li, R., Yin, Z. (2018) Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing. *J. of Materials Processing Technology*, 252, 128–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.020>
- Graf, M., Hälsig, A., Höfer, K. et al. (2018) Thermo-mechanical modelling of wire-arc additive manufacturing (WAAM) of semi-finished products. *Metals*, 8(12), 1009. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8121009>
- Ogino, Y., Asai, S., Hirata, Y. (2018) Numerical simulation of WAAM process by a GMAW weld pool model. *Weld World*, 62, 393–401. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0556-z>
- Rao, Z.H., Liao, S.M., Tsai, H.L. (2010) Effects of shielding gas compositions on arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding. *J. of Applied Physics*, 107(4), 044902. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3291121>
- Gurcik, T., Kovanda, K., Rohan, P. (2019) Influence of shielding gas on geometrical quality of WAAM technology. *METAL 2019 – 28th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, pp. 715–721. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2019.871>
- Bishal, S., Pudasaini, N., Roy, S. et al. (2022) Altering the supply of shielding gases to fabricate distinct geometry in GMA additive manufacturing. *Applied Sciences*, 12(7), 3679. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12073679>
- Mvola, B., Kah, P. (2016) Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, 88(9-12), 2369–2387. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8936-2>
- Gouda, M., Takahashi, M., Ikeuchi, K. (2005) Microstructures of gas metal arc weld metal of 950 MPa class steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 10(3), 369–377. DOI: <https://doi.org/10.1179/174329305X40714>
- Menzel, M. (2003) The influence of individual components of an industrial gas mixture on the welding process and the properties of welded joints. *Welding International*, 17(4), 262–264. DOI: <https://doi.org/10.1533/wint.2003.3111>
- Ebrahimnia, M., Goodarzi, M., Nouri, M., Sheikhi, M. (2009) Study of the effect of shielding gas composition on the mechanical weld properties of steel ST 37-2 in gas metal arc welding. *Materials & Design*, 30(9), 3891–3895. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.03.031>
- Zhao, Y., Shi, X., Yan, K. et al. (2018) Effect of shielding gas on the metal transfer and weld morphology in pulsed current MAG welding of carbon steel. *J. of Materials Processing Technology*, 262, 382–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.003>
- Spencer, J.D., Dickens, P.M., Wykes, C.M. (1998) Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *J. of Engineering Manufacture*, 212(3), 175–182. DOI: <https://doi.org/10.1243/0954405981515590>
- Tokihiko, K., Rinsei, I., Koichi, Y., Yoshinori, H. (2009) Development of low spatter CO₂ arc welding process with high frequency pulse current. *Science and Technology of Welding and Joining*, 14(8), 740–746. DOI: <https://doi.org/10.1179/136217109X449238>

INFLUENCE OF GMAW AND PAW METHODS OF ADDITIVE ARC SURFACING AND SHIELDING GAS COMPOSITION ON SURFACE GEOMETRY AND METAL STRUCTURE

V.V. Kvasnytskyi, I.M. Lagodzinskyi

NTUU «Kyiv Igor Sikorsky Polytechnic Institute, 37 Beresteiska Ave., 03056, Kyiv. E-mail: kvas69@ukr.net

With development of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) technologies there is the need to ensure stable quality characteristics of spatial products, and it is desirable to obtain a final surface with minimal geometrical inhomogeneity. Arc surfacing, in particular the process with short-circuiting (Cold Metal Transfer – CMT), and pulse-arc surfacing (Pulse process) allow greater control of weld pool melt behaviour, and reducing material losses for spatter and burn-out, which ensures higher productivity of the process. At the same time, investigations of the regularities of the influence of arc melting methods, in particular CMT, Pulse and PAW technologies, and composition of shielding gas atmosphere on the formed layer geometry, deposited metal structure and proneness to defect formation are urgent. Analysis of sample geometry indicates that the shielding gas mixture composition has an essential influence on the deposited layer height, irrespective of the surfacing method (CMT/Pulse). So, for M11 mixture the height of individual beads increases by 0.4...11.7 %, compared to use of M21 mixture. Application of pulsed current leads to 10...11 % increase in the bead width, compared to CMT process. Metallographic studies reveal product structure typical for multilayer surfacing. No clear boundary between the deposited metal layers was found. 18 Ref., 2 Tables, 9 Fig.

Keywords: WAAM, GMAW, Cold Metal Transfer, plasma, additive technologies, 09G2S, layer-by-layer surfacing, shielding gas mixture

Надійшла до редакції 25.10.2023