

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ WAAM НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ СМТ З ВИКОРИСТАННЯМ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ НЕЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

Мета роботи. Визначити оптимальні параметри режиму друку у процесі WAAM на основі технології СМТ; оцінити вплив параметрів друку на процес формоутворення валиків металу.

Методи дослідження. Аналітичний аналіз публікацій, геометричні вимірювання, статистичні дослідження.

Отримані результати. В ході експериментальної частини було виявлено зони задовільних та незадовільних комбінацій параметрів WFS та TS. При низьких значеннях WFS та високих TS процес формоутворення валика є нестабільним, спостерігаються розриви матеріалу, ширина валика має найнижче значення. При високих значеннях WFS та низьких TS наявні значний надлишок матеріалу, який виражається у помітних коливаннях перерізу наплавленого валика (напливи) та перегрів металу. При цьому поверхня має матово сірий колір, що свідчить про її надмірне окислення. Оптимальні значення WFS та TS дозволяють отримати стабільний процес друку, під час якого утворюється одиночний валик або шар металу стабільної форми поперечного перерізу у поздовжньому напрямі. Обрані параметри дозволили отримати десятишарову стінку з постійною шириною шарів 3,9 мм та гладкою поверхнею валиків. Хвилястість бокової поверхні отримана в межах від 0,2 до 0,5 мм.

Наукова новизна. Визначено зону оптимальних параметрів режиму процесу WAAM на основі технології СМТ з використанням суміші захисних газів Ar 90 % + CO₂ 10 % та вплив цих параметрів на геометричну форму наплавленого валика. В експерименті було використано синергетичну лінію параметрів Fronius для процесу СМТ.

Практична значущість. В ході роботи визначено зону оптимальних параметрів режиму друку та можливі наслідки некоректно підібраних режимів, що в подальшому дозволить поліпшити процес пошуку певної комбінації параметрів для тих чи інших вимог геометрії виробу. Визначено оптимальний режим друку, який стане основою для подальших досліджень процесу формоутворення валиків у різних умовах друку.

Ключові слова: WAAM, адитивне виробництво, вироцування, 3D друк, СМТ, геометричні параметри, оптимізація параметрів вироцування, погонна енергія.

Скорочення

ВТФ	Buy-to-Fly коефіцієнт використання матеріалу
СМТ	Cold Metal Transfer (технологія переносу металу, запатентована компанією Fronius)
GMAW	Gas Metal Arc Welding (електродугове зварювання у середовищі захисних газів)
TS	Швидкість переміщення пальника
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing (процес адитивного виробництва на основі дугових процесів зварювання)
WFS	Швидкість подачі дроту

Вступ

Сучасне виробництво схильне до підвищення експлуатаційних характеристик вироблених деталей та інструментів в багатьох випадках завдяки розробці і використанню матеріалів з покращеними властивостями. Матеріали такого роду, крім високих властивостей мають також і високу вартість, тому ефективне викорис-

тання матеріалу є однією з головних цілей сучасного виробництва. Вирішення цього завдання полягає у використанні сучасних методів адитивного виробництва, яке дозволяє збільшити коефіцієнт використання матеріалу ВТФ (Buy-to-Fly), тобто підвищити ефективність використання матеріалу шляхом наближення об'єму друкованої заготовки до об'єму кінцевого виробу [1].

Серед безлічі технологій адитивного виробництва, технологія WAAM є найбільш оптимальною у застосуванні при виробництві середньо- й великогабаритних виробів в одиничних екземплярах або дрібною серією.

Постановка задачі

Для забезпечення необхідної якості поверхні деталі, отриманої в результаті WAAM процесу на основі однієї з технологій GMAW, а саме СМТ, необхідно контролювати геометричні параметри кожного шару виробу. Такими параметрами є ширина і висота як окремо взятих валиків, так і їх комбінацій. Погано підібрані параметри друку неминуче призведуть до утворення як зварювальних дефектів, таких як пори, несплавлення та ін., так і дефектів геометричної форми валика, який наплавляється. Також, під впливом електричної дуги в процесі WAAM в тіло деталі переноситься велика кількість тепла. При вирощуванні з великим тепловнесенням збільшується кількість пор та розмір зерен у структурі матеріалу, а механічні властивості погіршуються [2]. Внаслідок повільного охолодження матеріалу, починаючи з першого й закінчуючи останнім шаром, спостерігається ефект акумуляції тепла. Акумуляція тепла і температура деталі також як і головні параметри друку, суттєво впливають як на стабільність процесу, так і на форму поперечного перерізу валиків [3–4].

Кінцевою метою цієї роботи є визначення оптимальних параметрів процесу WAAM на основі технології СМТ для стабільного формування шарів виробу з низьковуглецевої нелегованої сталі, а також оцінка впливу параметрів друку на процес формоутворення валиків металу.

Матеріали і методи

Для оцінки впливу головних параметрів процесу друку, а саме WFS та TS було сплановано та проведено наступний експеримент. Обрано чотири різні значення WFS та чотири значення TS. Їх скомбіновано у шістнадцять пар параметрів, які було використано для виготовлення шістнадцяти зразків. Це дозволило для кожної обраної WFS застосувати кожне обране значення TS. Значення цих параметрів та їх комбінації наведені в таблиці 1.

Для перевірки обраних комбінацій параметрів було створено програму наплавлення шістнадцяти валиків довжиною 100 мм для першого шару та 50 мм для другого. Другий шар дозволить зробити попередній висновок про придатність тих чи інших пар параметрів до багатошарового вирощування.

Процес виготовлення зразків здійснювався зварювальним роботом Motoman MA1440, обладнаним зварювальним комплектом для СМТ від Fronius, та зварювальним апаратом Fronius TPS500i, який має синерге-

тичні лінії для процесу СМТ. Синергетичні лінії у зварювальних апаратах – це набори пов'язаних між собою зварювальних параметрів, які були протестовані на стабільність та якість результату. При використанні синергетики зміна одного параметру веде до автоматичної або напівавтоматичної зміни іншого, відповідно до створених графіків або таблиць. Використання синергетичних процесів GMAW допомагає підвищити стабільність зварювання, знизити кількість бризок та знизити величини деформацій та тепловнесення за рахунок використання оптимальних комбінацій параметрів.

У якості присадного матеріалу використовували зварювальний дріт марки SG2 діаметром 1,0 мм. Для підкладки застосовували пластину з низьковуглецевої сталі S275. Використовувалася захисна суміш газів M21 (Ar 90%+ CO₂ 10%). Відстань від контактної наконечника зберігалась постійною на значенні 13 мм. Так само підтримувалась стабільною температура підкладки і температура між шарами, 50±5 °C та 100±10 °C відповідно. Контроль міжпрохідної температури є ключовим фактором до контролю акумуляції тепла [4–5]. За вказаними параметрами було виготовлено шістнадцять однопровідних тришарових зразків.

Результати

Після вирощування зразків (рисунок 1) їх ширина та висота були виміряні. Вимірювання відбувалося в трьох місцях валику на половині з одним шаром. У подальшому враховувалося середнє арифметичне значення.

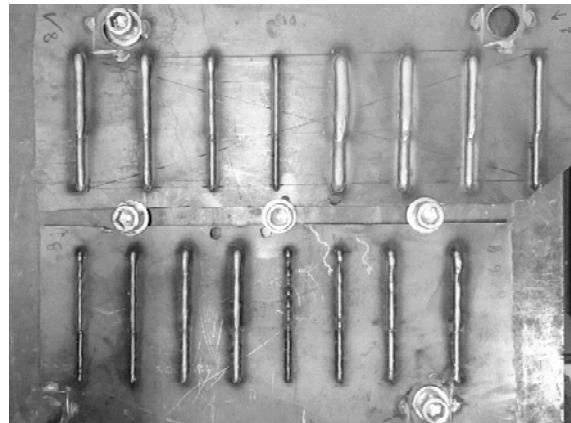


Рис. 1. Експериментальні зразки (перший зверху праворуч, порядок проти годинникової стрілки)

Аналіз геометрії показав, що при незмінній TS параметр WFS має більший вплив на ширину валика, ніж TS при незмінній WFS. Більший вплив на ширину помітний при зміні WFS на TS = 20 см/хв і TS = 40 см/хв (рисунок 2) та при зміні TS на WFS = 6 м/хв і WFS = 8 м/хв (рисунок 3).

Таблиця 1 – Експериментальні комбінації параметрів друку

№ зразка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
TS, см/хв	20	20	20	20	40	40	40	40	60	60	60	60	80	80	80	80
WFS, м/хв	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8

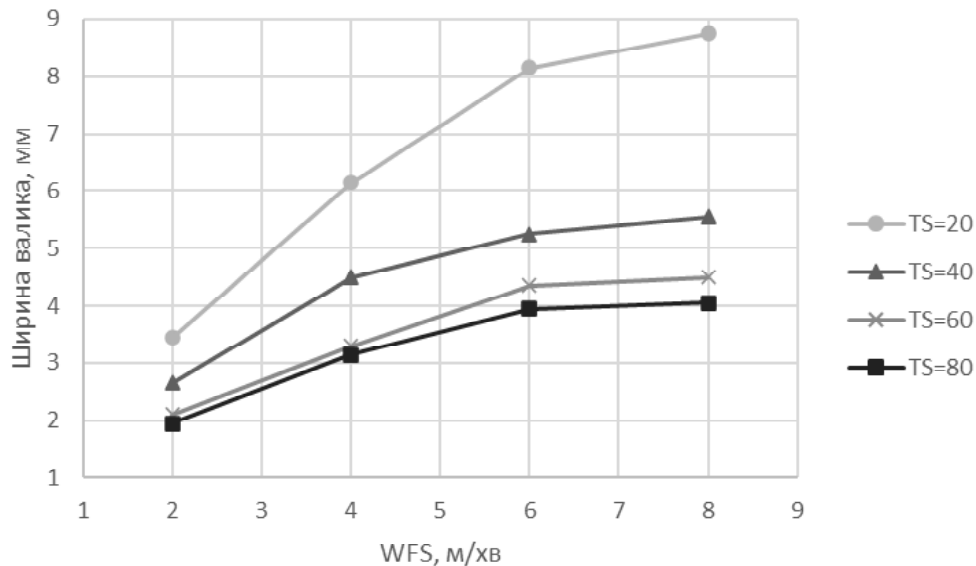


Рис. 2. Залежність ширини валика від WFS при постійній TS

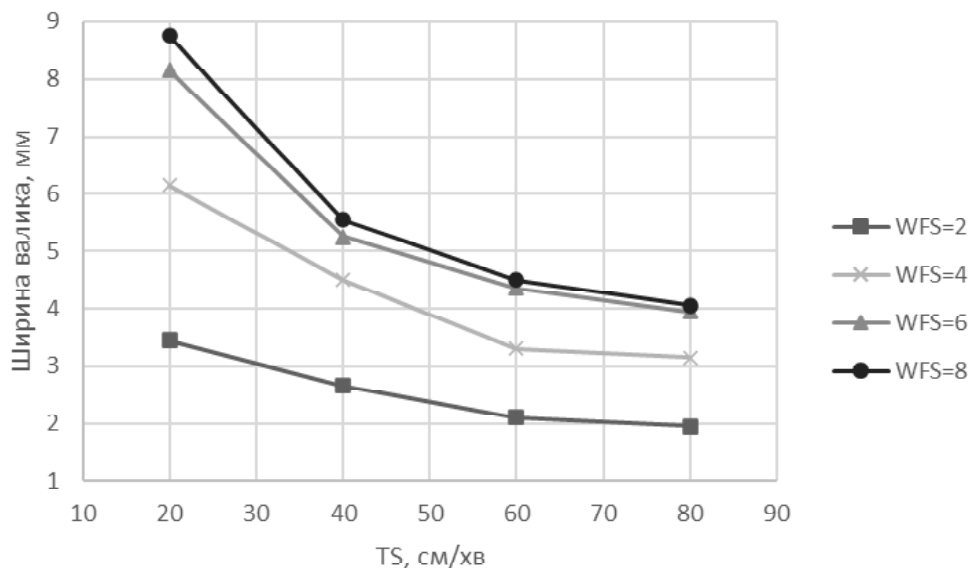


Рис. 3. Залежність ширини валика від TS при постійній WFS

Навпроти попередньому висновку, при незмінній TS параметр WFS має незначно менший вплив на ширину валика, ніж TS при незмінній WFS (рисунок 4). Це особливо помітно при зміні TS на WFS = 4 м/хв та WFS = 6 м/хв (рисунок 5).

З проведених експериментів спостерігається майже пряма залежність геометричних параметрів валиків від WFS та TS. Варіюючи цими параметрами в певних межах можна отримати валики різної ширини та висоти. Крім того різні комбінації параметрів WFS та TS дають змогу отримати валики з близькими геометричними характеристиками. При цьому кращим варіантом буде той, у якому при різних режимах друку і рівних за формою валиках буде використаний режим з найменшим тепловнесенням в деталь.

Погонну енергію для експериментальних пар параметрів (рисунок 6) було визначено за наступною формулою [6]:

$$H_i = \frac{\eta(U \cdot I)}{TS}, \quad (1)$$

де H_i – кількість внесеної в валик енергії, Дж;
 η – термічна ефективність процесу СМТ, прийнята 0,8 [7];
 U – середнє значення напруги зварювання, В;
 I – середнє значення струму зварювання, А;
 TS – швидкість переміщення пальника, мм/с.

Середня потужність дуги, тобто значення $(U \cdot I)$, були отримані зі зварювального апарату Fronius TPS500i. Значення погонної енергії, які розраховані за формулою 1 для експериментальних зразків та теоретичні значення для інших комбінацій показані на рисунку 6.

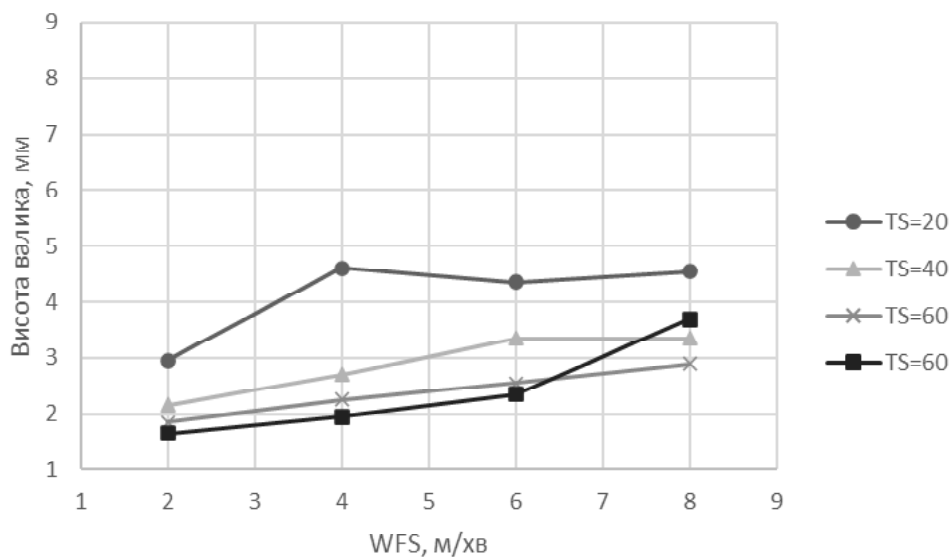


Рис. 4. Залежність висоти валика від WFS при постійній TS

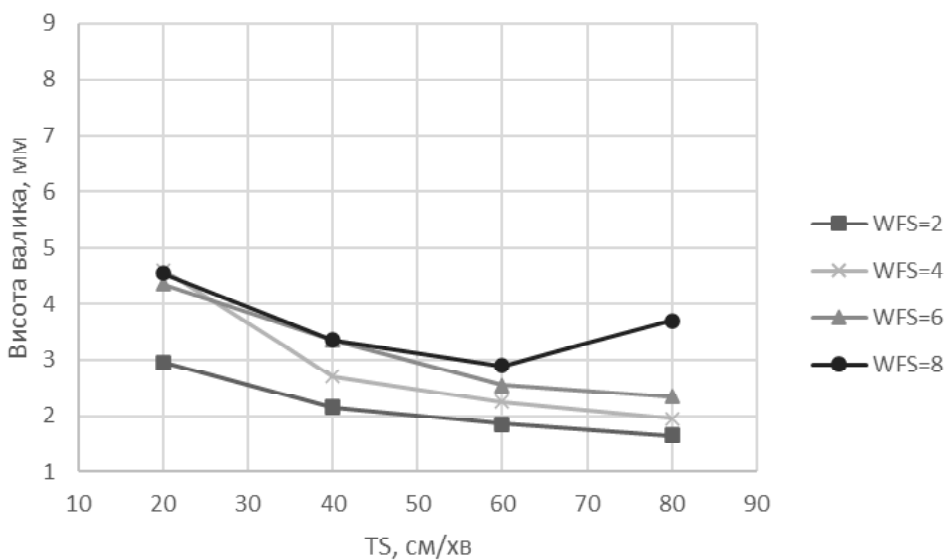


Рис. 5. Залежність висоти валика від TS при постійній WFS

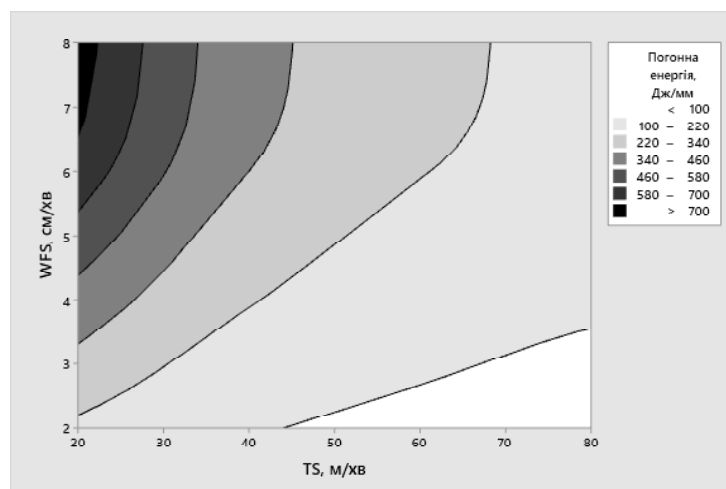


Рис. 6. Залежність погонної енергії для наплавлення валика від WFS та TS

З надрукованих зразків можна зробити висновок про придатність тієї чи іншої комбінації WFS та TS до стабільного та якісного формування валика при багатошаровому друці. При низькій TS та високій WFS очікувано спостерігається надлишок матеріалу, валик має матово сірий колір, що свідчить про його надмірну окисацію. Це відбулося через надмірну температуру валика, яка була отримана у результаті внесення великої кількості енергії (рисунок 6).

За великої TS та низької WFS спостерігається нестабільність формування валика та розриви у повздовжньому напрямку. Через низьку WFS відбувається нестача матеріалу для заданої TS, яка, в свою чергу, є за великою і стабільність дуги незадовільна.

При відносно великій TS (понад 60 см/хв) може спостерігатися нестабільність формування валика та його хвилястість, тобто площа поперечного перерізу не однакова по всій довжині.

Режими із зони, відміченої на рисунку 7, відповідають вимогам до геометрії валика, а саме: відсутність хвилястості по ширині та висоті, відсутність розривів

валика, знижена імовірність стікання металу під час друку, зменшена вірогідність утворення геометричних дефектів на початку та у кінці валика.

Базуючись на результатах експерименту для перевірки відміченої зони оптимальних для друку режимів було обрано пару параметрів для друку стінки з десяти шарів: TS = 50 см/хв, WFS = 4 м/хв. З попередніх експериментів було визначено, що перший шар має бути виконано з підвищеними параметрами режиму для забезпечення однакової ширини валиків першого та наступуючих шарів. Для цього WFS першого шару була збільшена до 5 м/хв.

Обрані параметри WAAM забезпечили гладку поверхню наплавлених шарів та відсутність небажаних дефектів поверхні (відсутність стікань розплавленого металу, хвилястість та підрізи). З цими оптимальними параметрами та використанням синергетики бокова поверхня стінки зразка формувалася з рівномірною хвилястістю без різких переходів між шарами. Глибина переходів була в межах від 0,2 до 0,5 мм.

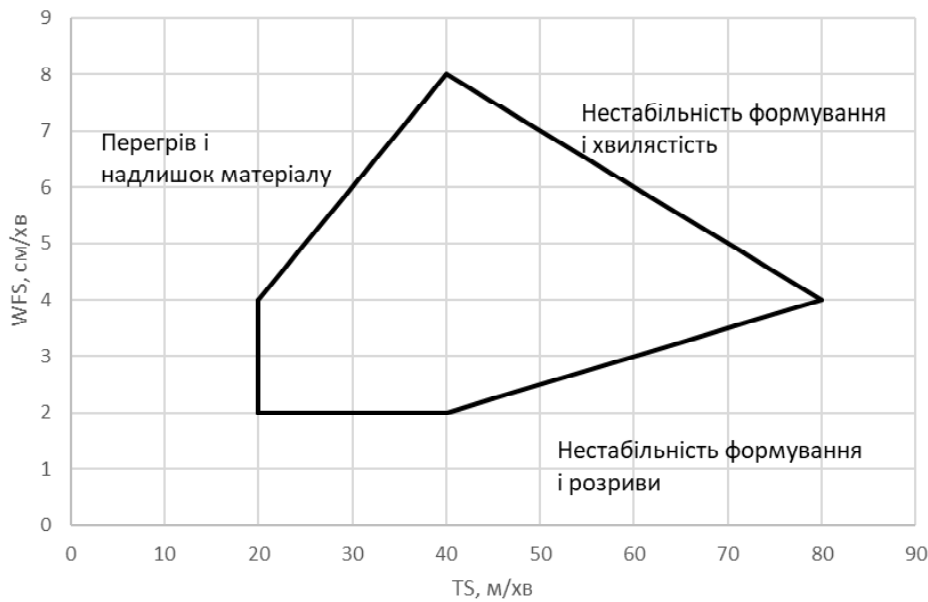


Рис. 7. Зона оптимальних для друку режимів

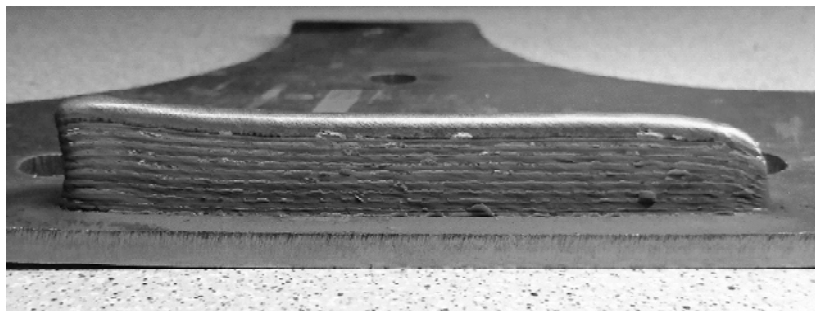


Рис. 8. Десятишаровий зразок для тестування визначених параметрів

Висновки

В результаті роботи було визначено зони задовільних та незадовільних комбінацій параметрів WFS та TS. При низьких значеннях WFS (біля 2 м/хв) та високих TS (60–80 см/хв) процес формоутворення валика є нестабільним, спостерігаються розриви матеріалу, ширина валика має найнижче значення. При високих значеннях WFS (близько 8 м/хв) та низьких TS (20–40 см/хв) спостерігається значний надлишок матеріалу, що виражається у формі валика, та перегрів металу. При цьому поверхня має матово сірий колір, що свідчить про її надмірне окислення. Оптимальні значення WFS та TS дозволяють отримати стабільний процес друку, під час якого утворюється одиночний валик або шар металу без коливань форми поперечного перерізу у повздовжньому напрямі. Для забезпечення необхідної ширини по всій висоті друкованого об'єкта нанесення початкових шарів слід проводити з підвищеними параметрами режиму. Нанесення наступних шарів слід здійснювати, контролюючи міжпрохідну температуру з урахуванням ефекту акумуляції тепла для запобігання його негативних наслідків.

Значення оптимальних параметрів є актуальними для процесу WAAM на основі технології CMT з використанням суміші захисних газів M21 (Ar 90% + CO₂ 10%). В експерименті було використано синергетичні лінії параметрів Fronius.

Результати роботи можуть бути використані для розробки оптимальних параметрів процесу WAAM для виробництва високоякісних металевих деталей з низьким вмістом вуглецю.

Список літератури

1. Cunningham C.R. et al. Cost Modelling and Sensitivity Analysis of Wire and Arc Additive Manufacturing // Procedia Manuf. 2017. – Vol. 11, № June 2017. – P. 650–657.
2. Wang S. et al. The influence of heat input on the microstructure and properties of wire-arc-additive-manufactured Al-Cu-Sn alloy deposits // Metals (Basel). 2020. – Vol. 10, № 1.
3. Montecvecchi F. et al. Heat accumulation prevention in Wire-Arc-Additive-Manufacturing using air jet impingement // Manuf. Lett. 2018. – Vol. 17. – P. 14–18.
4. Wu B. et al. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V // J. Mater. Process. Technol. Elsevier, 2017. – Vol. 250, August. – P. 304–312.
5. Montecvecchi F. et al. Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique // Addit. Manuf. Elsevier, 2018. – Vol. 21, January. – P. 479–486.
6. Li C. et al. Effect of Heat Input on Formability, Microstructure, and Properties of Al-7Si-0.6Mg Alloys Deposited by CMT-WAAM Process // Appl. Sci. 2019. – Vol. 10, № 1. – P. 70.
7. Pepe N. et al. Measuring the process efficiency of controlled gas metal arc welding processes // Sci. Technol. Weld. Join. 2011. – Vol. 16, № 5. – P. 412–417.

Одержано 28.12.2020

Молочков Д. Е., Куликовский Р. А., Фурманова Н. И. Определение оптимальных параметров процесса WAAM на основе технологии CMT с использованием низкоуглеродистой нелегированной стали

Цель работы. Определить оптимальные параметры режима нанесения материала в процессе WAAM на основе технологии CMT; оценить влияние параметров нанесения материала на процесс формообразования валиков металла.

Методы исследования. Визуальный контроль, аналитический анализ публикаций, геометрические измерения, статистические исследования.

Полученные результаты. В ходе экспериментальной части исследования были определены зоны удовлетворительных и неудовлетворительных комбинаций параметров WFS и TS. Анализ экспериментальных образцов показал, что при низких значениях WFS и высоких TS процесс формообразования валика является нестабильным, наблюдаются разрывы наплавленного слоя, недостаточная ширина валика. При высоких значениях WFS и низких TS наблюдается значительный избыток материала, который выражается в заметных колебаниях формы валика (наплывы), и перегрев металла. При этом поверхность имеет матово серый цвет, что свидетельствует о ее избыточном окислении. Оптимальные значения WFS и TS, выбранные из определённой в исследовании зоны, обеспечили стабильный процесс нанесения материала, во время которого был создан одиночный валик металла без заметных изменений формы поперечного сечения в продольном направлении. Выбранные параметры позволили получить десятислойную стенку с постоянной шириной слоев 3,9 мм и гладкой поверхностью валиков. Волнистость боковой поверхности получена в пределах от 0,2 до 0,5 мм.

Научная новизна. Определена зона оптимальных параметров режима нанесения материала процесса WAAM на основе технологии CMT с использованием смеси защитных газов Ar 90% + CO₂ 10% и влияние этих параметров на геометрическую форму валика. В эксперименте была использована синергетическая линия параметров для процесса CMT от компании Fronius.

Практическая ценность. В ходе работы определена зона оптимальных параметров режима печати и возможные последствия неудачно подобранных режимов, что в дальнейшем ускорит процесс поиска нужной комбинации параметров для тех или иных требований к геометрии изделия. Был определён оптимальный

режим нанесения материала, который будет использован для дальнейших исследований процесса формообразования валков в различных условиях выращивания.

Ключевые слова: WAAM, аддитивное производство, выращивание, 3D печать, CMT, геометрические параметры, оптимизация параметров выращивания, погонная энергия.

Molochkov D., Kulykovskiy R., Furmanova N. Determination of optimal parameters of WAAM process based on CMT technology using low carbon non-alloy steel

Purpose. To determine the optimal deposition parameters of the WAAM process based on CMT technology; to evaluate the influence of deposition parameters on the bead formation process.

Methods of research. Visual inspection, analysis of publications, geometrical measurements, statistical research.

Results. The zone of satisfactory and zones of unsatisfactory combinations of WFS and TS parameters were determined based on experiment results. The analysis of experimental samples showed that low values of WFS and high TS leads to the unstable bead formation process. With such combination beads width has the lowest value. Also, there is big possibility of gaps in beads to occur. High WFS and low TS values results in a significant excess of material, which affects the form of beads. Another effect of this combination is overheating of the metal. The surface has a matte gray color, which indicates its excessive oxidation. The optimal values of WFS and TS, selected from a defined area, provided a stable deposition process. A single pass bead was formed without noticeable fluctuations in the shape of the cross section in the longitudinal direction. Selected parameters allowed to obtain a ten-layer wall with a constant layer width of 3.9 mm and a smooth top surface of the wall. The waviness of the side wall surface in the range from 0.2 to 0.5 mm was achieved.

Scientific novelty. The zone of optimal parameters of the WAAM process based on CMT technology for low carbon steel and Ar 90 % + CO₂ 10 % shielding gas mixture was determined. The influence of these parameters on the geometric shape of the bead was defined. Experiments were carried out using a synergic line for the CMT process by Fronius.

Practical value. The zone of optimal deposition parameters and possible consequences of unsuccessfully selected combinations were determined, which will further speed up the process of finding the right combination of parameters for certain requirements of the product geometry. Deposition parameters from defined zone were tested and analyzed. The result could be the basis for further studies of the bead formation process in different deposition conditions.

Key words: WAAM, additive manufacturing, deposition, 3D printing, CMT, geometry parameters, optimization of deposition parameters, heat input.
