УДК 621.316.13

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ РОБОТОТЕХНІЧНОЮ ПЛАТФОРМОЮ 3D-ДРУКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

АНІКІН П.С. аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: *anikinps@zntu.edu.ua*;

ШИЛО Г.М. д-р техн. наук, завідувач кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: *shilo.gn@gmail.com*;

КУЛИКОВСЬКИЙ Р.А. к.т.н., доцент кафедри обладнання та технології зварювального виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: *r.kulikovski@ukr.net*;

МОЛОЧКОВ Д.Є. інженер-програміст ТОВ «Тріада ЛТД Ко», Запоріжжя, Україна, e-mail: *dmolochkov@gmail.com*.

Мета роботи. *Розробка архітектури системи автоматизованого керування робототехнічною платформою 3D- друку з використанням технології електродугового зварювання, структури її апаратних компонентів, алгоритму функціонування.*

Методи дослідження. *Для реалізації алгоритму програми керування використовується комп'ютерне моделювання теплових режимів в CAE-системі. Основні параметри технології друку окремого шару отримані шляхом експериментального використання технології адитивного виробництва електродуговим зварюванням.*

Отримані результати. *Визначено вимоги до технологічності та якості друку деталей у вигляді геометричних розмірів об'єкту, хвилястості поверхні, параметрів стану мікроструктури, залишкових напружень та збереження оптимальної швидкості виробництва. На основі вимог аналізу технологічності розроблено алгоритм програми керування. Створено архітектуру системи автоматизованого керування робототехнічною платформою адитивного виробництва, у якій застосовується зворотній зв'язок для контролю температурного режиму, параметрів геометричної форми деталі та зварювальної ванни. Розроблено трирівневу ієрархічну модель, що надає можливість розглядати окремо рівні створення валику, шару та стінки у процесі 3D-друку деталі. Визначено вхідні дані для роботи системи автоматизованого керування робототехнічною платформою з використанням технології електродугового зварювання. Розглянуто базові геометричні параметри зварювального валику та способи перекриття двох та більше валиків, при генерації програми для керування роботом показана необхідність урахування критичних відмінностей ідеальної та реальної моделей перекриття валиків. Проведено аналіз можливостей симуляції тривимірного друку з використанням технології електродугового зварювання в CAE-системах для визначення впливу температурних параметрів, механічних навантажень, зміни траєкторії руху створення деталі, та на основі отриманих даних визначення залишкових напружень та дефектів у вироблених деталях.*

Наукова новизна. *Запропоновано архітектуру системи автоматизованого керування робототехнічною платформою 3D-друку з включенням системи зворотного зв'язку для контролю температурного режиму, параметрів геометричної форми деталі та зварювальної ванни. Розроблено трирівневу ієрархічну модель технології адитивного виробництва з використання електродугового зварювання. Розроблено алгоритм функціонування системи, що надає можливість удосконалення геометричних та механічних властивостей готової продукції.*

Практична цінність. *Розробка автоматизованої системи керування робототехнічною платформою 3D-друку з використанням технології електродугового зварювання, що надасть можливість підвищити точність друку деталей та зменшити час виготовлення.*

Ключові слова: електродугове зварювання; CAE системи; робототехніка; слайсінг; 3D моделювання.

I. ВСТУП

На сьогодні, зварювальні технології є невід'ємною складовою тривимірного друку металевих виробів. Ще у 1926 році Бейкер запатентував спосіб «використання електричної дуги в якості джерела для отримання тривимірних об'єктів шляхом нанесення один на одного шарів розплавленого металу». Проте, значний проміжок часу подібні технології отримання тривимірних металевих об'єктів не знаходили пода-

© Анікін П.С., Шило Г.М., Куликовський Р.А., Молочков Д.Є., 2020
DOI 10.15588/1607-6761-2020-4-4

льший розвиток. Це було пов'язано в першу чергу з технологічними особливостями процесу та якістю отриманих виробів. Існуючі «традиційні» технології виробництва формоутворення виробів з металу, насамперед литво, обробка тиском та різанням забезпечували потрібну якість при прийнятних витратах на виробництво. Проте, технологічний розвиток та третя й четверта промислова революції створили прийнятні умови для появи та економічного підґрунтя для нових сучасних способів виготовлення виробів.

Наразі існує та промислово застосовується досить широкий перелік технологій об'ємного друку, які надають можливість вирощувати металеві вироби будь-якої складності. Від «традиційних» технологій їх відрізняє гнучкість, швидкість виготовлення, висока ступінь автоматизації процесів проектування та безпосереднього виготовлення деталей, зниження енергетичних та матеріальних витрат, більш низький негативний вплив на навколишнє середовище. Крім того, застосування цих процесів надає можливість принципово змінити планування етапів промислового виробництва, оптимізувати логістичну складову та мінімізувати участь в виробництві спеціального обладнання.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз можливостей існуючих адитивних технологій тривимірного друку металевих виробів (табл. 1) показав:

- для виготовлення деталей невеликих розмірів, які вимагають високу розмірну точність, прийнятним є застосування лазерних технологій типу SLM [1]-[3] або електронно-променевих типу PLM [4];

- для виготовлення великогабаритних виробів слід застосовувати технології, основою яких є методи дугового зварювання [5]-[8].

Через технологічні особливості, застосування лазерних або електронно-променевих технологій обумовлено високими витратами на виробництво, та як наслідок, високою вартістю готових виробів. Найбільш доступними технологіями з точки зору простоти та окупності процесу [9] є технології на основі дугових та плазмових процесів.

Процес адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання має значні переваги у виготовленні деталей великих розмірів. Для адитивного виробництва на базі технології лазерного запікання використовують спеціальну камеру для проведення процесу 3D друку, яка своїми розмірами обмежує максимальні габарити вироблюваної продукції. Через те, що під час процесу адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання використовується платформа, яка оснащена роботизованою рукою, рис. 1, що вільно рухається у заданому просторі, система не обмежена у розмірі необхідної для виробництва повного виробу. Такий підхід також надає можливість прискорити виробничий процес. В цьому випадку на швидкість виробництва впливають вимоги до якості деталі, яка буде вироблена, кількість шарів та їх товщина, швидкість нагріву, траєкторія нанесення, а також тип технології електродугового зварювання.

При тривимірному друці металевих виробів з використанням технології електродувого зварювання в якості виконавчого механізму найчастіше застосовуються роботизовані системи антропогенного типу. Обов'язковою складовою їх є необхідність розробки керуючої програми для маніпулятора. Однак особливість розвитку CAM систем для промислових роботів ускладнює широке використання технологій тривимірного друку цього напрямку. Так, кожен виробник промислових роботів використовує свою певну мову програмування. Крім того, існуючі розроблені симулятори великих виробників, в своїй масі, підтримують тільки задачі пов'язані з переміщенням інструменту маніпулятора та вмиканням або вимиканням в певний проміжок часу зварювальних програм.

Таким чином, з можливістю легкого програмування, платформа адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання може бути використана для друку великогабаритних деталей без необхідності розробки складного, високозатратного технологічного процесу.

Рисунок 1. Приклад роботизованої руки для процесу адитивного виробництва на ТОВ «Тріада ЛТД Ко»

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є розробка архітектури системи автоматизованого керування робототехнічною платформою 3D- друку з використанням технології електродугового зварювання, структури її програмних та апаратних компонентів та алгоритму функціонування

Таблица 1. Характеристика основних технологій адитивного виробництва металевих виробів

Джерело енергії	Технологія	Витратний матеріал		Порівняльні показники	
		форма	тип	Переваги	Обмеження та недоліки
Лазерний промінь	Пряме лазерне спікання (DMLS) [1] Вибіркове лазерне плавлення (EBM [2] Вибіркове лазерне спікання (SLS) [3]	порошок	будь-які металеві сплави	- висока деталізація елементів - висока точність (±5 мкм)	- низька енергоефективність – 2…5% - низька продуктивність процесу (не більше 10 см^3/год) - низький коефіцієнт використання матеріалу (40%)
Електронний промінь	Електронно-променеве плавлення (EBM) [4]	дріт, порошок	будь-які металеві сплави	- отримання деталей більш високої щільності та міцності порівняно з лазерними технологіями ; висока швидкість друку порівняно з іншими методами друку порошком; можливість використання порошків несферичної форми	- обмежена енергоефективність - 15…20%; - необхідність створення вакуумного середовища; - складність застосування; - висока базова вартість обладнання
Електрична дуга	- TIG [5] - MIG [6] - CMT [7]	суцільний та порошковий дріт	низьколегована конструкційна сталь, сплави на основі нікелю, алюмінію, титану та інші зварювальні матеріали;	- висока продуктивність (понад 500 см^3/год) - значна енергоефективність – до 95% - низька вартість обладнання - доступність	- значні залишкові напруження та деформації виробу; - низька точність виготовлення виробу; - значна зона термічного впливу
	Плазмово-дугова [8]	порошок	будь-які металеві сплави, композиційні матеріали	- міцність до 100% від міцності основного металу; -більш висока енергоефективність в порівнянні зі звичайними електродуговими процесами:	- значні залишкові напруження та деформації виробу; - низька точність виготовлення виробу;
		дріт	низьколегована конструкційна сталь, сплави на основі нікелю, алюмінію, титану та інші зварювальні матеріали;		

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- спроектувати архітектуру системи адитивного виробництва;
- розробити алгоритм функціонування системи;
- розробити ієрархічну модель технології адитивного виробництва методом електродугового зварювання.

Розроблена архітектура повинна передбачити зворотній зв'язок за результатами вимірювання температурних показників, показників перевірки геомет-

рії та показників перевірки параметрів зварювальної ванни для забезпечення автоматизованого керування тривимірним друком. В ієрархічній моделі необхідно передбачити обов'язкові три рівні: перший рівень це - валик, який містить в собі геометричні параметри однієї зварювальної одиниці. Другий рівень, це - шар, який містить геометрію контуру та топологію. Третій рівень - стінка, яка містить інформацію щодо уклонів та кривизни вертикальних поверхонь.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Виробництво за допомогою 3D-друку з використанням технології електродугового зварювання можна розглядати як систему, яка складається з чотирьох основних частин, рис. 2. Блок програмного забезпечення (CAD/CAM/CAE) відповідає за процес створення та підготовки геометричного об'єкту, введення вхідних даних параметрів деталі та їх подальше корегування під час аналізу технології виготовлення виробу. Отримані дані з блоку CAD/CAM/CAE відправляються до блоку числового програмного керування (ЧПК), що забезпечує контроль та процес виробництва. В процесі виготовлення деталі для захисту її від можливих деформацій, які можуть призвести до руйнації заготовки або її пошкодження, система містить в собі блок зворотного зв'язку представлений у вигляді пристрою, який перевіряє температурні показники, геометричні властивості деталі, а також розміри зварювальної ванни.

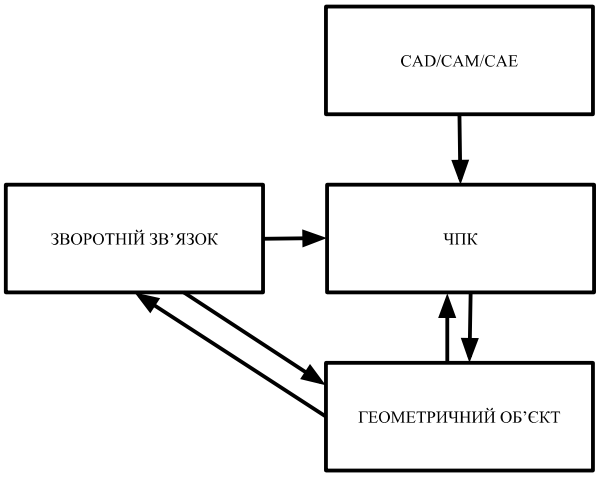

Рисунок 2. Базова архітектура системи адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання

Блок ЧПК контролює процес створення зазначеного геометричного об'єкту, тобто заготовки, на основі попередньо введених даних, в той час як пристрій зворотного зв'язку перевіряє відповідність показників температури, геометричних властивостей та розміру зварювальної ванни у порівнянні до зазначених нормативних параметрів на наявність аномальних відхилень, які можуть призвести до браку деталі.

Кожна деталь, яка буде виготовлена у процесі виробництва, має специфічні вимоги, що мають бути попередньо розглянуті для успішного процесу її створення. Такі вимоги можуть бути розділені на п'ять основних категорій представлених на рис. 3.

Під час процесу виробництва об'єкту, який складається з двох або більше валиків, поміж ними виникає періодично повторювана нерівність площини, яка зветься хвилястістю поверхні. Її параметри визначаються типом технології зварювання, довжиною, шириною, рівнем проплавлення, та величиною розтікання валику [10]. Оптимальні параметри хвилястості поверхні дозволяють підтримувати певну геометричну постійність розмірів готового виробу.

Для визначення залишкових напружень та стану мікроструктури попередньо проводяться температурні та структурні симуляцій, а також симуляцій різних типів навантаження у CAE-системах. Мінімізація напружень відбувається за допомогою вибору різних типів металів та домішок для процесу виробництва, розгляду їх фізичних властивостей, визначення розмірів підкладки на якій буде проводитися друк та методів її закріплення, контролю температурних режимів.

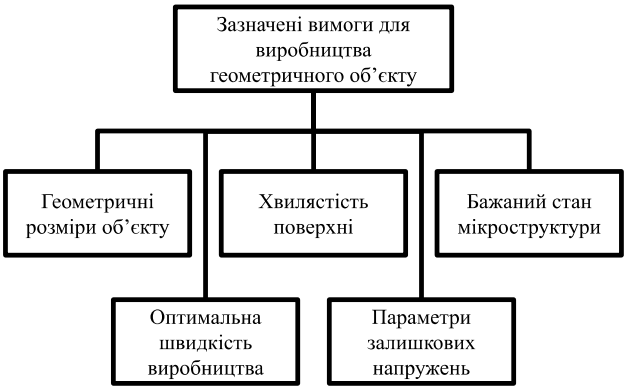

Рисунок 3. Вимоги до якості друку деталей

Схему аналізу технології адитивного виробництва методом електродугового зварювання з використанням параметрів визначених вимог до якості друку деталей наведено на рис. 4.

Параметри теплових властивостей визначаються розрахунком максимально допустимого рівня нагрівання [11]. За допомогою цих даних можна запобігти помилці процесу виробництва за якої геометричний об'єкт набирає занадто велику сумарну теплову масу, що приводе до нестабільної структури та руйнуванню виробу. Під час друку, тепло з новоствореного валику передається до вже надрукованих і постійно підсумовується. При досягненні максимально-допустимої температурної величини необхідно зупинити процес та дочекатися охолодження вже надрукованого об'єкту. Для отримання оптимальної швидкості виро-

бництва, яка залежить від загального теплового розподілу, повинні бути розраховані конкретні часові рамки та диференційована траєкторія шляху друку.

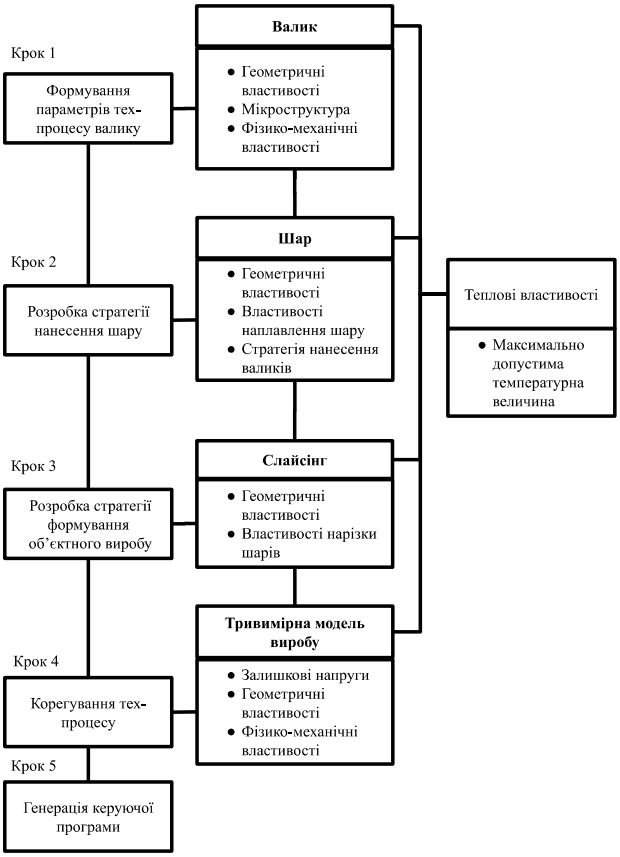

Рисунок 4. Схема аналізу технології виробництва об'єкту

Параметри властивостей валику визначаються: геометричним розміром, тобто його довжиною, шириною, висотою та формою поперечного перерізу; дослідженням розповсюдження залишкових напружень; зміни мікроструктури під впливом температури [12]; фізико-механічних властивостей - міцність та мікротвердість. Після цього в автоматизованому режимі формуються параметри технологічного процесу виготовлення валику.

На основі попередньо введених даних щодо властивостей валику можна перейти до визначення параметрів властивостей шару, його ширини, довжини. Шар розглядається як окрема структура, що складається з одного або більше валиків та може мати складну геометричну форму. Для успішного процесу створення шару необхідно визначити його ширину, висоту, властивості наплавлення, а також стратегію нанесення валиків. Отримані дані дозволяють перейти до програмної розробки стратегії нанесення шару.

Після визначення та введення параметрів властивостей валику та шару, попередньо створений у CAD-системі тривимірний геометричний об'єкт має бути розрізаний на шари за допомогою процесу слайсингу [13]. Задається ширина і товщина шарів, величина кроку поміж ними, корегується їх формація [14]. Кожен шар можна розглядати окремо відносно необхідних технічних, геометричних та інших заданих параметрів. В автоматизованому режимі генерується стратегія формування виробу.

Аналіз тривимірної моделі виробу надає можливість переглянути параметри залишкових напруг, геометричні та фізико-механічні властивості та за необхідності, програмно скорегувати технологічний процес.

Завершення аналізу всіх основних параметрів процесу виробництва дозволяє запустити генерацію керуючої програми.

Отримані після програмної обробки параметри надсилаються до апаратної частини системи, рис. 5. Пристрій числового програмного керування, на який надсилаються дані, відповідає за контроль п'яти компонентів апаратного забезпечення, а також за пристрій вимірювання у реальному часі.

Параметрами системи руху є зміна швидкості та контроль траєкторії, що керується визначенням куту під яким наноситься матеріал і висоти відносно основи на якій відбувається процес друку або відносно вже надрукованої частини деталі.

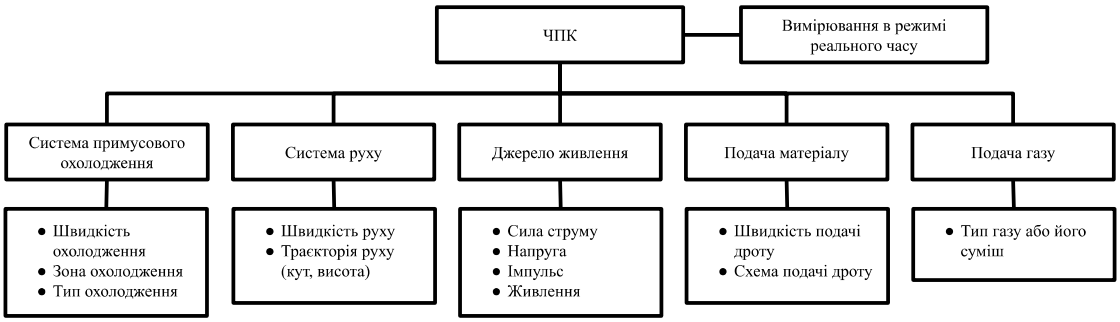

Рисунок 5. Структура та параметри компонентів апаратного забезпечення

Компонент джерела живлення відповідає за увімкнення та вимкнення постачання живлення до системи, встановлення значень сили току, наявності імпульсу або його відсутності, що дозволяє використо-

вувати різні технології зварювання від звичайного GMAW до, наприклад, процесу CMT, розробленого компанією Fronius.

Параметрами подачі матеріалу є швидкість подачі дроту (wire feed speed) та схема його подачі. Дріт з котушки за допомогою пристрою подачі дроту проходить по спеціальному каналу до зварювального пальника, який направляє дріт в зону друку/наплавлення металу.

Для захисту розплавленого металу від хімічної реакції з навколишнім середовищем використовується система подачі захисного газу. Деякі типи газів можуть не тільки захистити процес виробництва але навіть і покращити металургійні властивості виробу, тому основними параметрами є вибір необхідного типу захисного газу або їх сумішей.

Система примусового охолодження призначена для підтримання оптимального теплового стану під час процесу адитивного виробництва. За типами тепловідводу можна виділити рідинний та повітряний. Основними параметрами є зміна інтенсивності охолодження та вибір зони охолодження.

Для перевірки виробу на наявність дефектів, відповідність геометричної форми, структури валиків, дотримання температурного режиму та параметрів зварювальної ванни введено пристрій вимірювання зі зворотним зв'язком у реальному часі (рис. 6). Під час процесу адитивного виробництва такий пристрій, який складається з модулів лазеру та відеоспостереження, за наявності критичної ситуації дозволяє запобігти помилковому виробництву та ввести корективи у процес.

Більш детальне дослідження геометрії валику може проводитись шляхом розробки співвідношення між його властивостями та параметрами зварювання на основі обробки результатів експерименту, отриманих за допомогою регресивного аналізу [15]. Проводяться дослідження також в напрямках використання технології мереж штучного інтелекту або їх комбінації з попередньо використовуваними методами [16].

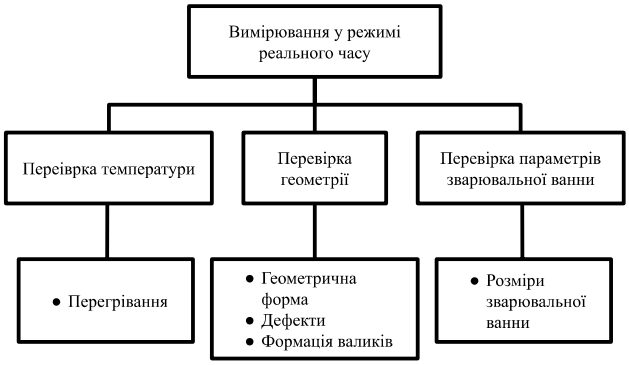

Рисунок 6. Параметри блоку зворотного зв'язку

На базі визначених вимог до адитивного виробництва, розгляду параметрів компонентів апаратної частини, відповідальних за виконання процесу друку, розроблено алгоритм роботи системи, рис. 7.

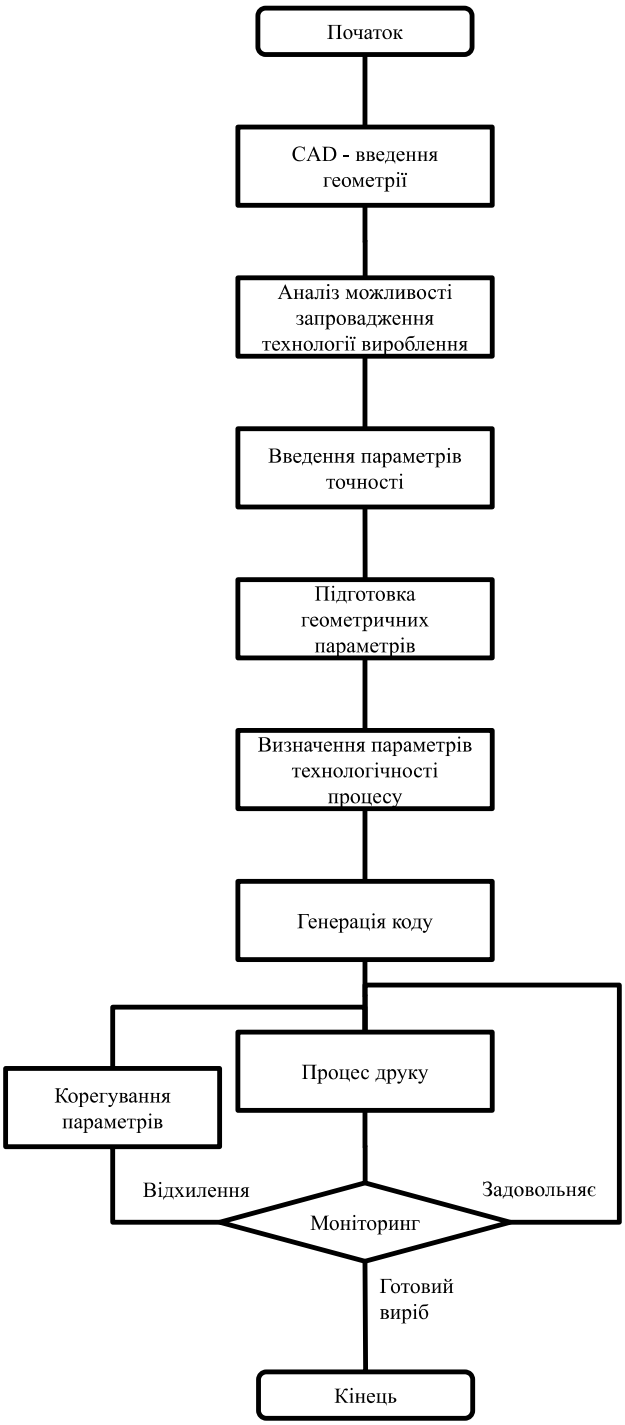

Рисунок 7. Алгоритм функціонування системи

Під час процесу друку можуть утворюватися валики різних форм: округлої, параболічної або косинусоїдної функції. Кожна форма проходить процес вимірювання з різними зварювальними параметрами, після чого відбувається їх порівняння. Дослідження показали, що оптимальна модель валику залежить від відношення швидкості подачі дроту до швидкості зва-

рювального процесу [17]. Простий одиночний зварювальний валик, рис. 8, у даному випадку – параболічний, може бути доволі легко описано за допомогою його висоти, *h*, його ширини, *w* та глибини проплавлення, *d*.

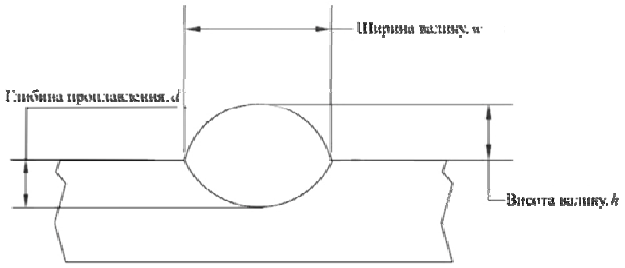

Рисунок 8. Зварювальний валик з висотою, *h*, шириною, *w* та глибиною проплавлення, *d*

Як показують попередні дослідження [18], *w* та *h* можна визначити використовуючи різні зварювальні параметри:

$$w=\frac{3\pi \cdot v_w \cdot d_w^2}{8h \cdot v_t} \quad (1)$$

$$h=C_1 \cdot v_w^2+C_2 \cdot v_t^2+C_3 \cdot v_w \cdot v_t+C_4 \cdot v_w+C_5 \cdot v_t+C_6 \quad (2)$$

v_w – швидкість подачі дроту;

v_t – швидкість руху зварювання.

Більш детальну інформацію наведено у [10].

Для опису двох або більше валиків використовуються моделі з перекриттям. На даний час існує дві основні моделі для валиків з перекриттям:

- FOM - Flat-top Overlapping Model, модель перекриття з рівною поверхнею площини;
- TOM - Tangent Overlapping Model, дотична модель перекриття.

Традиційну модель перекриття з рівною поверхнею площини, також відому як FOM (рис. 9), можна описати як декілька одиночних валиків з висотою, *h*, шириною, *w*, глибиною проплавлення, *d,* та відстані між центрами сусідніх валиків, *x*. На схематичній моделі також показані зони перекриття та жолобу. Якщо значення змінної *x* більше ніж *w*, перекриття - відсутнє. Зменшення значення *x* в залежності від розміру ширини валику до оптимальної величини, надає можливість вирівняти поверхню площини, тобто зменшити її хвилястість. У ідеальному випадку, під час збігання значень величин зони перекриття та зони жолобу, поверхня площини поміж валиками стане повністю рівною. Однак результатами експериментальних досліджень [18] показано, що існування такої зони неможливо [19], хвилястість структури зберігається.

Дотична модель TOM (рис. 10) надає більш детальне уявлення про реальну структуру перекриття валиків.

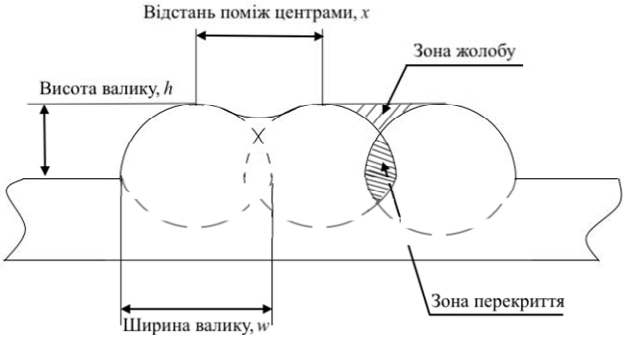

Рисунок 9. Схематична модель перекриття з рівною поверхнею площини (FOM)

У схематичній моделі перекриття з рівною поверхнею площини спосіб поєднання сусідніх валиків представлено у вигляді прямої лінії. Проте експериментально було досліджено, що поміж двома валиками існує критична відмінність геометрії жолобу [20]. Цей параметр відображено у розглянутій другій моделі перекриття.

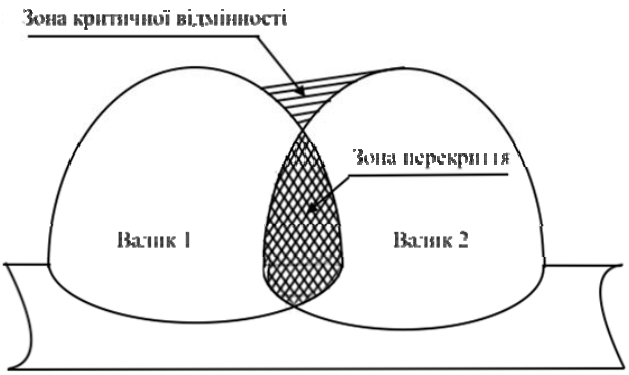

Рисунок 10. Схема дотичної моделі перекриття

Під час адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання можливо утворення великої кількості валиків біч-о-біч. Це може призвести до їх поєднання поміж собою та утворення мульти-перекриття. Хоча й така структура не вирізняється стабільністю, у деяких випадках вона може бути ефективною. У такому разі, для отримання стабільного процесу виробництва, оптимальні параметри перекриття та відстань поміж центрами суміжних валиків мають бути розраховані окремо.

У процесі адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання можна використовувати як загальні критерії для 3D-друку взагалі, так і ті, які пов'язані тільки з конкретно зазначеною вище технологією.

Для більшого розуміння процесу автоматизації 3D-друку з використанням технології електродугового зварювання запропоновано алгоритм генерації керуючої програми, рис. 11.

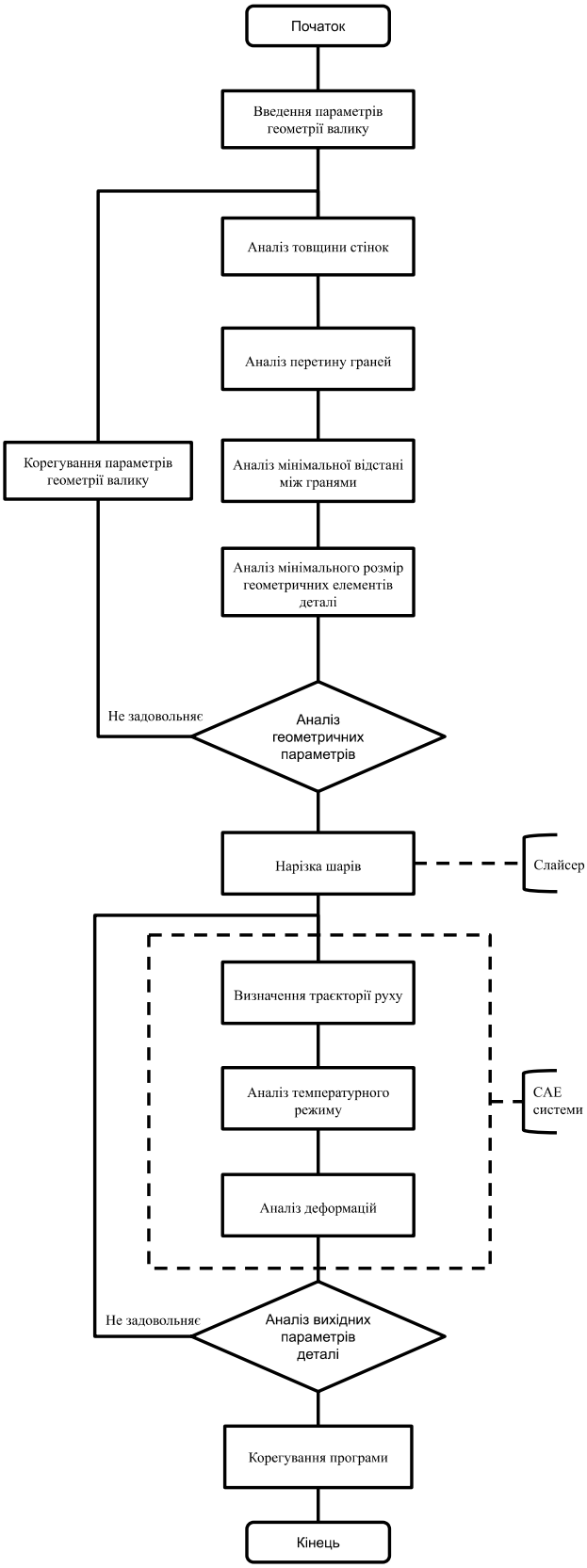

Рисунок 11. Алгоритм генерації керуючої програми

Алгоритм містить в собі та узагальнює всі попередньо зазначені параметри. На першому етапі вводиться геометрія валику. Наступні 5 етапів складаються з аналізу товщини стінок, перекриття валиків, задання мінімальної відстані між валиками, визначення мінімального розміру геометричних елементів деталі та аналізу остаточних отриманих геометричних параметрів. Якщо отримані геометричні параметри не задовольняють систему, необхідно провести корегування параметрів валику та знову повторити п'ять етапів аналізу. Якщо отримані геометричні параметри задовольняють систему, то процес переходить до програмного забезпечення слайсеру, де відбувається нарізка шарів. Після завершення процесу слайсингу отриманий результат передається до САЕ-систем. Відбувається визначення траєкторії руху, аналіз температурних режимів та деформацій. Остаточним кроком є аналіз отриманих вихідних даних. У разі отримання результату, який не задовольняє систему, необхідно змінити параметри та наново пройти три етапи аналізу у САЕ-системах. Якщо результат вихідних параметрів деталі задовольняє систему, то відбувається процес друку. Під час процесу друку використовується електронний прилад зворотного зв'язку. У разі визначення відхилень, прилад передає інформацію до системи, після чого відбувається корегування програми.

Для визначення параметрів технологічного процесу було проведено експериментальні дослідження на роботизованому зварювальному комплексі, наданому ТОВ «Тріада ЛТД Ко». Приклади експериментальних деталей зображено на рис. 12.

Рисунок 12. Експериментально отримані деталі використовуючи GMAW Standard (ліворуч) та GMAW CMT (праворуч)

Результатами експерименту визначено вплив обраного типу зварювання та його параметрів, висвітлених у табл. 2, на властивості надрукованої заготівки.

Однакові за розміром та висотою заготівки відрізняються кількістю надрукованих шарів. При однаковій заданій середній величині ширини шару, яка дорівнює 4,9-5,2мм, величина висоти шару напряму залежить від технології зварювання. Використовуючи GMAW CMT вона дорівнює – 2,3-2,8мм, а GMAW Standard – 1,8-2,2мм. Так, для виготовлення заготівки використовуючи GMAW CMT необхідно створити 36 шари. Для виготовлення заготівки використовуючи

GMAW Standard – 44 шари. Адитивне виробництво з використанням технології GMAW CMT надає більш задовільний результат порівняно з GMAW Standard.

Таблиця 2. Параметри нанесення матеріалу

Тип зварювання	GMAW CMT	GMAW Standard
Стан зварювання	PA (1G)	PA (1G)
Виліт електроду	15±2 мм	15±2 мм
Швидкість зварювання	70 см/хв	80 см/хв
Швидкість подачі дроту	10,0±1 м/хв	9,0±1 м/хв
Зварювальний струм	201±5 А	188±5 А
Напруга	16,1±0,5 В	20,7±0,5 В
Газ	15±1 л/хв	15±1 л/хв

Для узагальнення інформації про геометрію та технологію виготовлення деталі запропоновано трирівневу ієрархічну модель адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання, рис. 13. Перший рівень ієрархічної моделі - валик, його геометричні розміри та обраний тип перекриття. Другий рівень – шар, у якому розглядається геометрія шару та хвилястість поверхні шару, підбирається траєкторія руху задля створення необхідного контуру шару, а також рівномірного розподілу тепла. Третій рівень – стінка. Досліджується хвилястість поверхні стінки, параметри залишкових напружень, геометричні параметри, які містять в себе уклони та кривизну вертикальних поверхонь.

Для дослідження температурних режимів та деформацій, які можуть виникнути під час процесу друку з використанням технології електро-дугового зварювання, застосовуються CAE-системи [21]. Одними з найбільш відомих є ANSYS, ABAQUS та SimScale. Кожна з зазначених програм надає певний спектр професійних можливостей для проведення симуляцій розповсюдження тепла, структурного аналізу та інших. Програма ANSYS з модулем Additive Suite має великий діапазон підтримки різних можливостей, проте обмежується використанням лише власної мови програмування APDL (ANSYS Parametric Design Language).

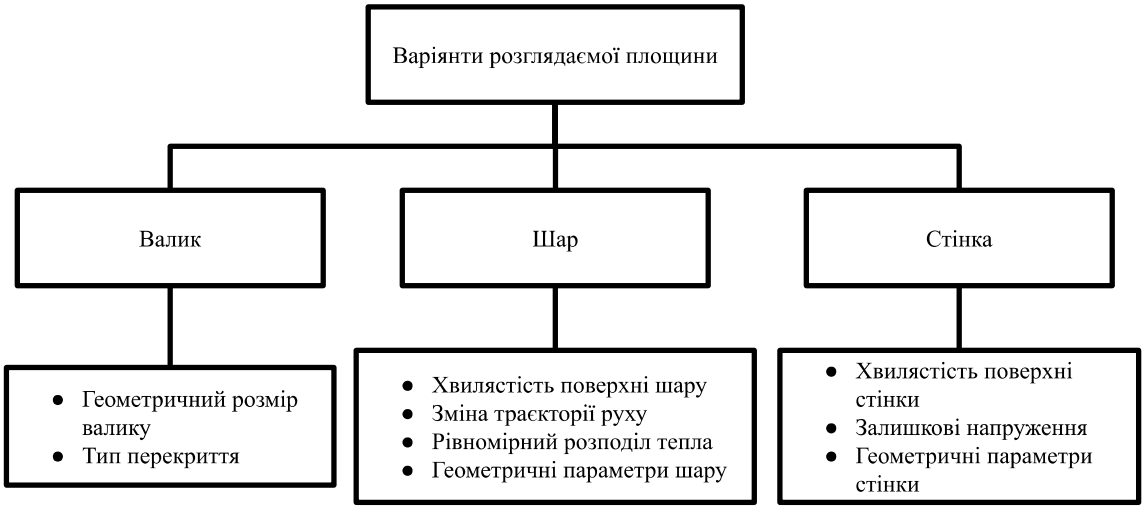

Рисунок 13. Трирівнева ієрархічна модель адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання

Програма ABAQUS (рис. 14) теж має багатоваріативний спектр можливостей, але натомість, підтримує написання скриптів мовою програмування Python. Найбільша перевага SimScale, це орієнтоване на користування через веб-браузер програмне забезпечення, яке не вимагає обчислювальної потужності порівняно з двома попередніми програмами симуляції.

Для процесу симуляції необхідно ввести геометричні параметри виробу, товщину металевої підкладки, тип матеріалу з якого буде надруковано деталь, його фізичні властивості. Необхідно задати розмір валику та температурні значення з якими буде відбуватися процес друку. Визначити наявність або відсутність температурних лазерів. Обрати частини для охолодження. Розрізати деталь на задані валики та обрати стратегію руху нанесення в одному чи в двох напрямках, хрестовим або спіральним способами [22]. Програмне введення таких властивостей валику як умовна межа текучості, коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга та інших температурно-залежних параметрів [23] надає можливість провести у програмі симуляції температурний аналіз для визначення розповсюджен-

ня тепла на об'єкті. На процес наплавлення також має вплив конвекція та радіація, що відбуваються на всіх поверхнях які піддаються впливу повітря. Через те, що процес передачі тепла відбувається вздовж активованих валиків, температура зварювання для кожного окремого кроку симуляції має бути розрахована та введена попередньо, так само як і температура повітря, яка, як правило встановлюється у проміжку від 20С до 50С [22]. Отримані данні температурного аналізу надають можливість провести структурний аналіз, що дозволяє виявити структурні деформації та перевірити властивості виробу щодо різними типів навантажень.

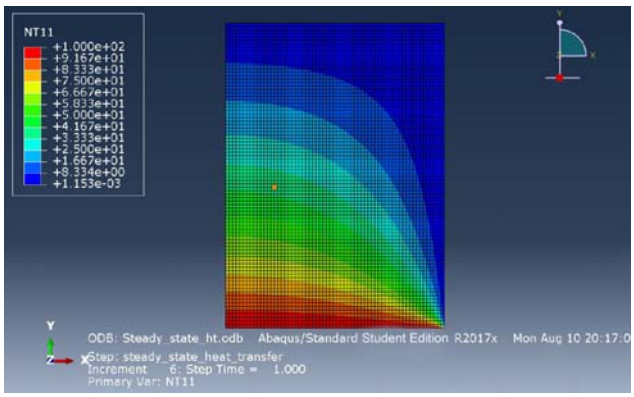

Рисунок 14. Приклад симуляції розповсюдження тепла у CAE-системі Abaqus

Симуляція друку виглядає як процес в якому наплавлені валики створюються один за одним у попередньо визначеному порядку із зазначеною температурою плавлення та траєкторією нанесення [24]. Кожна нова нанесена одиниця розповсюджує тепло до вже наплавлених валиків, створюючи підвищення температури всієї системи.

V. ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень було розроблено архітектуру системи автоматизованого керування робототехнічною платформою адитивного виробництва у якій застосовується зворотній зв'язок для контролю температурного режиму, параметрів геометричної форми деталі та зварювальної ванни.

Визначено вимоги до технологічності та якості друку деталей, вхідні дані для роботи системи автоматизованого керування робототехнічною платформою з використанням технології електродугового зварювання. Розроблено алгоритми роботи системи та алгоритм програми керування. Розроблено трирівневу ієрархічну модель, яка надає можливість розглядати окремо рівні створення валику, шару та стінки у процесі 3D-друку деталі. Розглянуто базові геометричні параметри зварювального валику та способи перекриття двох та більше валиків, при генерації програми для керування роботом, показана необхідність урахування критичних відмінностей ідеальної та реальної моделей перекриття валиків. Проведено аналіз можливостей симуляції тривимірного друку з використанням технології електродугового зварювання в CAE-системах для визначення впливу температурних параметрів, механічних навантажень, зміни траєкторії руху створення деталі, та на основі отриманих даних визначення залишкових напружень й дефектів у вироблених деталях.

Практичні дослідження проводились на роботизованому зварювальному комплексі, наданому фірмою «Тріада ЛТД Ко».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Subrahmanyam A. Critical review on characterization of DMLS materials / A. Subrahmanyam, P. Srinivasa, K. Prasad // Journal of Xi'an University of Architecture and Technology. – 2020. - №14. 665-688.

[2] Stelzer N. Mechanical properties of surface engineered metallic parts prepared by additive manufacturing / N. Stelzer, M. Scheerer, L. Bača // The European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing. - 2018.

[3] Nguyen Huu Study on optimization of PES/CaCO 3 composite powder for selective laser sintering (SLS) 3D printing technology / Nguyen Huu, Guo Yanling, Tat, Thang Nguyen, Yu Yueqiang // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. 612. DOI:10.1088/1757-899X/612/3/032104.

[4] Dragunov V. Investigation of the optimal modes of electron-beam wire deposition / V. Dragunov, M. Goryachkina, A. Gudenko, A. Sliva, A. Shcherbakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. 681. DOI:10.1088/1757-899X/681/1/012008.

[5] Eyercioglu O. Evaluatuion of overhang angle in TIG welding-based wire arc additive manufacturing process / O. Eyercioglu, Y. Atalay, M. Aladag // International Journal of Research - GRANTHAALAYAH. - 2020. - №7(10). 247-254. DOI:10.29121/granthaalayah.v7.i10.2019.393.

[6] Bai Yishan Research on Microstructure and Properties of 304 Stainless Steel Made by MIG Filler Additive Manufacturing / Bai Yishan, Gao Qingwei, Chen Xin, Yin Hao, Fang Longfei, Zhao Jian // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2019. 237. DOI:10.1088/1755-1315/237/3/032096.

[7] Fang X. Analysis of characteristics of process parameters in CMT additive manufacturing / X. Fang, C. Ren, H. Bai, C. Wang, B. Lu // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. 504. DOI:012018. 10.1088/1757-899X/504/1/012018.

[8] Artaza T. Influence of Heat Input on the Formation of Laves Phases and Hot Cracking in Plasma Arc Welding (PAW) Additive Manufacturing of Inconel 718 / T. Artaza, T. Bhujangrao, A. Suarez, F. Veiga, A.

Lamikiz // Metals - Open Access Metallurgy Journal –2020. -№ 10(771). 1-17. Doi:10.3390/met10060771

[9] Korzhyk V. Welding Technology in Additive Manufacturing Processes of 3D Objects / V. Korzhyk, V. Khaskin, O. Voitenko, V. Sydorets, O. Dolianovskaia // Materials Science Forum. – 2017. - №906. 121-130. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.906.121

[10] Dinovitzer M. Effect of Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process Parameters on Bead Geometry and Microstructure / M. Dinovitzer, Chen Xiaohu, J. Laliberte, Huang Xiao, H. Frei // Additive Manufacturing. – 2019. - 26. DOI:10.1016/j.addma.2018.12.013.

[11] Ding J. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts / J. Ding, P. Colegrove, J. Mehnen, S. Ganguly, P.M. Sequeira Almeida, F. Wang, S. Williams // Computational Materials Science. -2011. DOI:10.1016/j.commatsci.2011.06.023

[12] Ho Alistair On the Origin of Microstructural Banding in Ti-6Al4V Wire-Arc Based High Deposition Rate Additive Manufacturing / Ho Alistair, Zhao Hao, J. Fellowes, F. Martina, A. Davis, P. Prangnell // Acta Materialia. – 2019. - 166. DOI:10.1016/j.actamat.2018.12.038.

[13] Adnan F. Real-time slicing algorithm for Stereolithography (STL) CAD model applied in additive manufacturing industry/ F. Andan, F. Romlay, M. Shafiq // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. - 342. D:10.1088/1757-899X/342/1/012016

[14] Hu J. Study on STL-based slicing process for 3D printing. Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium / J. Hu // An Additive Manufacturing Conference. – 2017.

[15] Almeida P. S. Innovative process model of Ti–6Al–4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT) / P.S. Almeida, S. Williams // In Proceedings of the Twenty-first Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA. – 2010.

[16] Xiong J. Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis / J. Xiong // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2012. pp. 1-7.

[17] Xiong J. Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing / J. Xiong // Robotics and Computer Integrated Manufacturing. – 2012.

[18] Suryakumar S. Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing / S. Suryakumar // Computer-Aided Design. – 2011. - №43. pp. 331-344.

[19] Aiyiti W. Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping / W. Aiyiti // Rapid Prototyping Journal. – 2006. - №12. pp. 165-172.

[20] Ding D. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) / D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2015. - №31. pp. 101-110.

[21] Mehnen J. Design study for wire and arc additive manufacture / J. Mehnen, Ding Jialuo, H. Lockett, P. Kazanas, // Int. J. of Product Development. – 2014. - №19. pp. 2 - 20. DOI:10.1504/IJPD.2014.060028.

[22] Wang J. Effects of deposition strategies on macro/microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti 6Al 4V / J .Wang, Xin Lin, Li Jiaqiang, Y.L Hu, Zhou Yinghui, Wang Chong, Li Qiuge, Huang Weidong // Materials Science and Engineering. – 2019. A. 754. DOI:10.1016/j.msea.2019.03.001.

[23] Graf M. Thermo-Mechanical Modelling of Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Semi-Finished Products / M. Graf, A. Hälsig, K. Höfer, B. Awiszus, P. Mayr // Metals. – 2018. - №8. p.1009. DOI:10.3390/met8121009.

[24] Israr R. Simulation of different path strategies for wire-arc additive manufacturing with Lagrangian finite element methods / R. Israr, J. Buhl, L. Elze, M. Bambach // Brandenburg University of Technology Cottbus–Senftenberg, Chair of Mechanical Design and Manufacturing, LS-DYNA Forum, Bamberg. – 2018.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2020

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ 3D-ПЕЧАТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ

АНИКИН П.С. аспирант, Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: anikinps@zntu.edu.ua;

ШИЛО Г.Н. д-р техн. наук, заведующий кафедрой информационных технологий электронных средств Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: shilo.gn@gmail.com;

КУЛИКОВСКИЙ Р.А. к.т.н., доцент кафедры оборудования и технологии сварочного производства Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: r.kulikovski@ukr.net;

МОЛОЧКОВ Д.Е. инженер-программист ТОВ «Триада ЛТД Ко», Запорожье, Украина, e-mail: dmolochkov@gmail.com.

Цель работы. *Разработка архитектуры системы автоматизированного управления робототехнической платформой 3D- печати с использованием технологий электродуговой сварки, структуры ее компонентов и алгоритма функционирования.*

Методы исследования. *Для реализации алгоритма программы управления используется компьютерное моделирование тепловых режимов в CAE-системах. Основные параметры технологии печати отдельного слоя получены путем экспериментального использования технологии аддитивного производства электродуговой сваркой.*

Полученные результаты. *Определены требования к технологичности и качества печати деталей в виде геометрических размеров объекта, волнистости поверхности, параметров желаемого состояния микроструктуры, остаточных напряжений и сохранения оптимальной скорости производства. На основе требований анализа технологичности разработан алгоритм программы управления. Создано архитектуру системы автоматизированного управления робототехнической платформой аддитивного производства в которой применяется обратная связь для контроля температурного режима, параметров геометрической формы детали и сварочной ванны. Разработано трехуровневую иерархическую модель, которая дает возможность рассматривать отдельно уровни создания валика, слоя и стенки в процессе 3D-печати детали. Определены входные данные для работы системы автоматизированного управления робототехнической платформой с использованием технологии электродугового сварки. Рассмотрены базовые геометрические параметры сварочного валика и способы перекрытия двух и более валиков, при генерации программы для управления роботом показана необходимость учета критических различий идеальной и реальной моделей перекрытия валиков. Проведен анализ возможностей симуляции трехмерной печати с использованием технологии электродуговой сварки в CAE-системах для определения влияния температурных параметров, механических нагрузок, изменения траектории движения создания детали, и на основе полученных данных возможность определения остаточных напряжений и дефектов в производимых деталях.*

Научна новизна. *Предложена архитектура системы автоматизированного управления робототехнической платформой 3D-печати, которая включает в себя системы обратной связи для контроля температурного режима, параметров геометрической формы детали и сварочной ванны. Разработано трехуровневую иерархическую модель технологии аддитивного производства по использованию электродуговой сварки. Разработан алгоритм программы управления, который предоставляет возможность усовершенствования геометрических и механических свойств готовой продукции.*

Практическая ценность. *Разработка автоматизированной системы управления робототехнической платформой 3D-печати с использованием технологии электродуговой сварки, которая позволит повысить точность печати деталей и уменьшить время их изготовления.*

Ключевые слова: электродуговая сварка; CAE системы; робототехника; вертикальная нарезка (слайсинг); 3Д моделирование.

AUTOMATION CONTROL SYSTEM OF 3D PRINTING ROBOTIC PLATFORM WITH IMPLEMENTED WIRE + ARC WELDING TECHNOLOGY

ANIKIN P.S. Postgraduate student of National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: anikinps@zntu.edu.ua;

SHILO G.M. D.Sc., Head of the Department of Information Technologies of Electronic Devices of National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: shilo.gn@gmail.com;

KULYKOVSKYI R.A. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the welding technology and equipment department of National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: r.kulikovski@ukr.net;

MOLOCHKOV Software engineer TRIADA LTD CO (Triada-Welding), Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail:

D.E. dmolochkov@gmail.com;

Purpose. *Development of the robotic platform automated control system architecture, development of the software control algorithm.*

Methodology. *To implement the algorithm of the control program, computer modeling of thermal regimes in CAE systems is used. The basic parameters of the single layer printing technique were obtained by experimental use of the wire plus arc additive manufacturing (WAAM) technology.*

Findings. *Requirements for manufacturability and printing quality of the manufactured parts were defined in the form of geometric dimensions, surface waviness, parameters of the desired microstructure state, residual stresses, maintaining of the optimal manufacturing speed. Based on the requirements of manufacturability analysis, an algorithm for the control program was developed. Robotic platform automated control system architecture with feedback device for the thermal mode control, parameters of the geometrical form of the manufactured part and weld pool were developed. Three -level hierarchical model, which gives an ability to consider in the process of 3D printing each level individually in terms of welding bead, layer and wall, was developed. The input data for the operation of the automated control system of the robotic platform using the technology of electric arc welding are determined. Basic geometrical parameters and the simple welding bead and the methods of overlapping of two or more beads were shown. Critical differences between ideal and real welding overlapping models were considered for necessity of taking into account whilst generating robot control software. Analysis of the possibilities for the CAE simulation of the three-dimensional printing using wire plus arc additive manufacturing technology is performed to determine the influence of the temperature parameters, mechanical loads, toolpath change, and based on the data obtained, it became possible to determine residual stresses and defects in manufactured parts.*

Originality. *Robotic platform automated control system architecture with feedback device for the control of thermal mode, parameters of the geometrical form of the manufactured part and weld pool was developed. Three-level hierarchical model for the wire plus arc additive manufacturing (WAAM) technology was created. Software control algorithm which provides an opportunity to improve geometrical and mechanical properties of the manufactured parts was developed.*

Practical value. *Development of an automated control system for 3D printing robotic platform with WAAM implemented technology, which will provide an opportunity for increase in the printing accuracy of the manufactured parts and will help to reduce manufacturing time.*

Keywords: WAAM, CAE systems, Robotics, Vertical slicing, 3D modeling.

REFERENCES

[1] Subrahmanyam A., Srinivasa P., Prasad K. (2020) Critical review on characterization of DMLS materials. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology. 14. 665-688.

[2] Stelzer N., Scheerer M., Bača L. (2018) Mechanical properties of surface engineered metallic parts prepared by additive manufacturing. The European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing.

[3] Nguyen Huu, Guo Yanling, Tat, Thang Nguyen, Yu Yueqiang (2019) Study on optimization of PES/CaCO 3 composite powder for selective laser sintering (SLS) 3D printing technology. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 612. DOI:10.1088/1757-899X/612/3/032104.

[4] Dragunov V., Goryachkina M., Gudenko A., Sliva A., Shcherbakov A. (2019) Investigation of the optimal modes of electron-beam wire deposition. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 681. DOI:10.1088/1757-899X/681/1/012008.

[5] Eyercioglu O., Atalay Y., Aladag M. (2020) Evaluatuion of overhang angle in TIG welding-based wire arc additive manufacturing process. International Journal of Research - GRANTHAALAYAH. 7(10). 247-254. DOI:10.29121/granthaalayah.v7.i10.2019.393.

[6] Bai Yishan, Gao Qingwei, Chen Xin, Yin Hao, Fang Longfei, Zhao Jian (2019) Research on Microstructure and Properties of 304 Stainless Steel Made by MIG Filler Additive Manufacturing. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 237. DOI:10.1088/1755-1315/237/3/032096.

[7] Fang X., Ren C., Bai H., Wang C., Lu B. (2019) Analysis of characteristics of process parameters in CMT additive manufacturing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 504. DOI:012018. 10.1088/1757-899X/504/1/012018.

[8] Artaza T., Bhujangrao T., Suarez A., Veiga F., Lamikiz A. (2020) Influence of Heat Input on the Formation of Laves Phases and Hot Cracking in Plasma Arc Welding (PAW) Additive Manufacturing of Inconel 718. Metals - Open Access Metallurgy Journal. 10(771). 1-17. Doi:10.3390/met10060771

[9] Korzhyk V., Khaskin V., Voitenko O., Sydorets V., Dolianovskaia O. (2017). Welding Technology in Additive Manufacturing Processes of 3D Objects. Materials Science Forum. 906, 121-130. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.906.121

[10] Dinovitzer M., Chen Xiaohu, Laliberte J., Huang Xiao, Frei H. (2019) Effect of Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process Parameters on Bead Geometry and Microstructure. Additive Manufacturing. 26. DOI:10.1016/j.addma.2018.12.013.

[11] Ding J., Colegrove P., Mehnen J., Ganguly S., Se-

queira Almeida P.M., Wang F., Williams S. (2011) Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. Computational Materials Science. DOI:10.1016/j.commatsci.2011.06.023

[12] Ho Alistair, Zhao Hao, Fellowes J., Martina F., Davis A., Prangnell P. (2019) On the Origin of Microstructural Banding in Ti-6Al4V Wire-Arc Based High Deposition Rate Additive Manufacturing. Acta Materialia. 166. DOI:10.1016/j.actamat.2018.12.038.

[13] Adnan F., Andan, F., Romlay F., Shafiq M. (2019) Real-time slicing algorithm for Stereolithography (STL) CAD model applied in additive manufacturing industry. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 342. D:10.1088/1757-899X/342/1/012016

[14] Hu J. (2017) Study on STL-based slicing process for 3D printing. Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. An Additive Manufacturing Conference.

[15] Almeida P. S., Williams S. (2010) Innovative process model of Ti–6Al–4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT). In Proceedings of the Twenty-first Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA.

[16] Xiong J. (2012) Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis. Journal of Intelligent Manufacturing. 1-7.

[17] Xiong J. (2012) Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing. Robotics and Computer Integrated Manufacturing.

[18] Suryakumar S. (2011) Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing. Computer-Aided Design. 43, 331-344.

[19] Aiyiti W. (2006) Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping. Rapid Prototyping Journal. 12, 165-172.

[20] Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. (2015) A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 31, 101-110.

[21] Mehnen J., Ding Jialuo, Lockett H., Kazanas P. (2014) Design study for wire and arc additive manufacture. Int. J. of Product Development. 19, 2 - 20. DOI:10.1504/IJPD.2014.060028.

[22] Wang J., Lin Xin, Jiaqiang Li, Hu Y.L, Zhou Yinghui, Wang Chong, Li Qiuge, Huang Weidong (2019) Effects of deposition strategies on macro/microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti 6Al 4V. Materials Science and Engineering. A, 754. DOI:10.1016/j.msea.2019.03.001.

[23] Graf M., Hälsig A., Höfer K., Awiszus B., Mayr P. (2018) Thermo-Mechanical Modelling of Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Semi-Finished Products. Metals. 8, 1009. DOI:10.3390/met8121009.

[24] Israr R., Buhl J., Elze L., Bambach M. (2018) Simulation of different path strategies for wire-arc additive manufacturing with Lagrangian finite element methods. Brandenburg University of Technology Cottbus–Senftenberg, Chair of Mechanical Design and Manufacturing, LS-DYNA Forum, Bamberg.