

УДК 621.791.75:004.8

Лагодзінський І.М., PhD; Квасницький В.В., д.т.н., проф.; Чорний А.В., к.т.н.;

Зворикін К.О., к.т.н., доц.; Черній В.О., асп.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

АЛГОРИТМІЧНЕ ПЛАНУВАННЯ ЦИКЛУ WAAM ВИГОТОВЛЕННЯ З АДАПТИВНИМ УРАХУВАННЯМ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ПРОСТОРОВИХ ВИРОБІВ

Анотація. Створений алгоритм генерування управляючих команд для системи адитивного дугового наплавлення WAAM, що враховує тепловий стан виробу та його габаритні розміри при розрахунковому визначенні діючих технологічних параметрів процесу наплавлення на різних ділянках траєкторії. Описано експериментальну установку, матеріали для проведення досліджень, особливості генерування рекомендованих базових параметрів режимів наплавлення. Обґрунтована доцільність інтеграції контролю міжшарової температури як основи для подальшого вдосконалення системи керування з динамічним зворотнім зв'язком.

Ключові слова: WAAM, планування траєкторій, теплова модель, масштабний фактор, G-код, контроль температури.

**Ivan Lahodzinskyi, Viktor Kvasnytskyi, Andrii Chorny, Kostiantyn Zvorykin,
Vladyslav Chernii**

ALGORITHMIC PLANNING OF THE WAAM MANUFACTURING CYCLE WITH ADAPTIVE CONSIDERATION OF THE THERMAL STATE OF SPATIAL PRODUCTS

Abstract. An algorithm has been developed for generating control commands for the WAAM additive arc cladding system, which takes into account the thermal state of the workpiece and its overall dimensions when calculating the operating process parameters for cladding in different sections of the trajectory. The experimental setup, materials used for the research, and the specifics of generating the recommended basic parameters for the cladding modes are described. The feasibility of integrating interlayer temperature control as a basis for further improvement of the control system with dynamic feedback is substantiated.

Keywords: WAAM, toolpath planning, thermal model, scale factor, G-code, temperature control.

Технологія Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) набуває все більшого поширення в промисловості завдяки високій продуктивності наплавлення та нижчій вартості порівняно з порошковими методами адитивного виробництва. Більшість існуючих систем планування траєкторій адаптують FDM-слайсери або комерційні САМ-пакети без урахування теплової моделі процесу, що призводить до накопичення тепла між шарами, нестабільності геометричної форми наплавлених шарів та утворення дефектів типу тріщин. Завдання ускладнюється тим, що кількість накопиченого тепла залежить від габаритів виробів, тому застосування однакових алгоритмів керуючого програмного забезпечення дає різні результати для виробів різного розміру та форми. Разом з тим, переважна більшість розглянутих підходів не враховує масштабний фактор як самостійний параметр при генеруванні траєкторії наплавлення окремих шарів, а відсутність зворотного зв'язку за температурою поверхні унеможливорює оперативне коригування режимів наплавлення в реальному часі. Таким чином, наукове дослідження є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки

спрямоване на вирішення ключових проблем використання WAAM технологій у сучасній промисловості.

Для отримання просторових виробів було розроблене програмне забезпечення яке реалізує наскрізний процес перетворення від CAD-моделі до машинних команд (рис.1). Алгоритм охоплює такі кроки: аналіз геометричної форми виробу та визначення напрямку формування наплавленого шару; розрахунок рекомендованих параметрів режиму процесу наплавлення з урахуванням комплексу властивостей матеріалу, що наплавляється та геометричних розмірів виробу; нарізання моделі на шари із заданою висотою валика та генерування контурної траєкторії; розрахункова оцінка теплового стану кожного шару з урахуванням допустимої температури між шарами для матеріалу, що наплавляється; формування керуючої програми у форматах CNC G-код, ABB RAPID або KUKA KRL.

З метою мінімізації кількості накопиченого тепла в одній зоні виробу запропоновано стратегію зміни ділянок початку наплавлення між шарами: непарні шари починаються з одного боку деталі, парні – з протилежного, що забезпечує більш рівномірний розподіл температури між різними ділянками як по довжині траєкторії наплавлення, так і по висоті виробу. Параметри технологічного процесу адитивного наплавлення динамічно коригуються залежно від поточного теплового стану деталі.

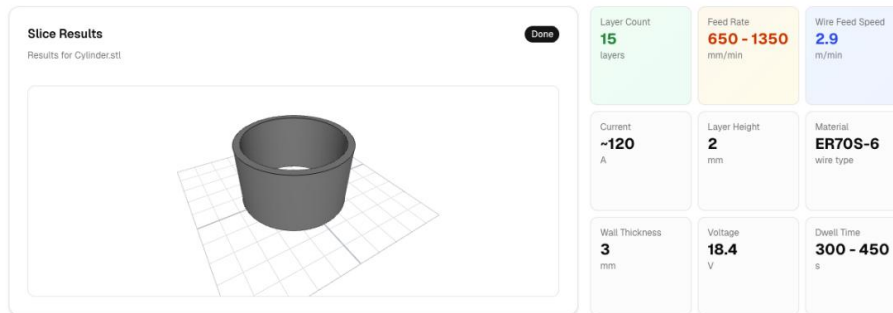


Рисунок 1. Інтерфейс розробленого програмного забезпечення: результати нарізання моделі виробу на окремі шари та рекомендовані базові параметри процесу наплавлення

Дослідження виконані за допомогою тривісної портальної системи з керуванням за допомогою команд G-коду та із застосуванням зварювального MIG/MAG джерела зварювального струму Fronius VarioSynergic 4700. Витратні матеріали: електродний дріт ER70S-6, Ø 1,2 мм, захисна газова суміш $Ag(82\%) + CO_2(18\%)$. Параметри наплавлення: рекомендований усереднений базовий струм $I = 120$ А, напруга на дузі $U = 18,4$ В, швидкість подачі дроту $WFS = 2,9$ м/хв; швидкість переміщення пальника адаптивно збільшується від 650 до 1350 мм/хв залежно від теплового стану деталі та траєкторії наплавлення. Критерії вибору режиму: стабільність процесу наплавлення та відтворюваність геометричної форми окремих валиків. Окрім того, при визначенні рекомендованих базових параметрів режиму наплавлення необхідно враховувати мінімізацію глибини проплавлення попередньо сформованого шару (критерії максимальної висоти та мінімальної ширини кожного окремого валика). Керуюча програма для кожного шару містить послідовність спеціалізованих макрокоманд: активація процесу наплавлення, встановлення параметрів режиму наплавлення, переміщення до початкової ділянки формування наплавленого шару, запалювання електричної дуги, виконання контурної траєкторії, гасіння електричної дуги; витримка з наступним припиненням подачі захисного газу для пасивного охолодження (рис. 2). Тривалість витримки визначається алгоритмом індивідуально для кожного шару на основі розрахункового визначення теплового стану просторового виробу.

За однакових вхідних параметрів (марка присадного дроту, спосіб наплавлення, склад захисного газового середовища тощо) виготовлення виробів різних габаритних розмірів та форми потребує коригування рекомендованих базових технологічних параметрів процесу наплавлення та зміни робочих алгоритмів керуючого програмного забезпечення. Розрахунок теплового стану ґрунтується на оцінці питомої кількості енергії, що внесена у виріб при формуванні кожного окремого шару, з урахуванням часу наплавлення та пасивного охолодження між шарами. Погонна енергія наплавлення, що визначається діючими параметрами процесу, є основою для визначення параметрів теплової моделі. Для кожного окремого шару алгоритм порівнює розрахункову температуру поверхні з граничним значенням та визначає необхідний час витримки перед наступним проходом.

Просторовий виріб невеликих габаритних розмірів має меншу кількість накопиченого тепла, але і кожен шар завершується за менший час, що зменшує тривалість пасивного охолодження між проходами. Для великогабаритних деталей, наплавлення окремого шару займає більше часу та забезпечує можливість природного охолодження попередньо наплавленого металу під час руху пальника по траєкторії наплавлення інших ділянок до закінчення наплавлення шару. Це дозволяє зменшити тривалість паузи для охолодження металу попередньо наплавленого валика перед наплавленням наступного або рідше зупиняти процес наплавлення.

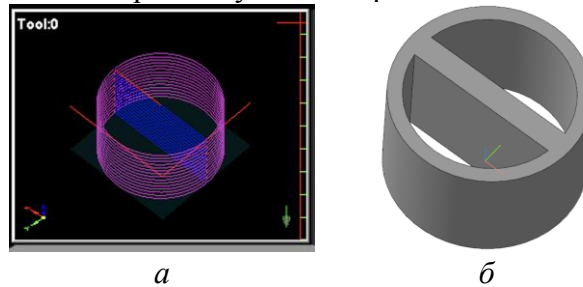


Рисунок 2. Візуалізація траєкторії наплавлення циліндричного виробу у середовищі ЧПК-керування (а) та вихідна CAD модель (б)

Зокрема, для зразка з діаметром та висотою 40 мм тепла модель прогнозує досягнення граничної температури між шарами 150°C вже після 3–4 шарів, що за результатами розрахунків вимагає витримки тривалістю 60 – 90 с перед початком наступного проходу. При цьому, швидкість переміщення пальника на перших шарах становить 650 мм/хв і зростає до 980 мм/хв у міру накопичення тепла. Для деталі з діаметром та висотою 180 мм за аналогічних параметрів процесу температурний поріг досягається лише після 8–10 шарів, а необхідна витримка скорочується до 15–25 с завдяки тривалішому природному охолодженню під час переміщення пальника. Таким чином, одна й та сама CAD-модель, збільшена у 4 рази, дає різну кількість шарів, різний час охолодження та різні значення швидкості зварювання на кожному шарі.

Поточна реалізація ґрунтується на розрахунковій тепловій моделі без зворотного зв'язку. Для підвищення точності заплановано інтеграцію динамічного зворотного зв'язку за температурою між шарами: температура поверхні після кожного шару порівнюватиметься з рекомендованою температурою між шарами для матеріалу, що наплавляється (для ER70S-6 – не вище 150°C), за результатами порівняння температур тривалість паузи коригуватиметься автоматично.

Наукові дослідження проведені за грантової підтримки НФДУ, проєкт №2025.05/0040 «Адитивне дугове наплавлення просторових металевих виробів складної геометричної форми з програмним перетворенням цифрових даних 3-Д моделі» (0126U003566).