

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI 10.25140/2411-5363-2023-4(34)-9-22

УДК 681.6:621.791.75

Павло Анікін¹, Галина Шило²

¹аспірант кафедри телекомунікації та радіотехніки

Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

E-mail: anikinps@zntu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6767-784X>. ResearcherID: [JDD-8719-2023](https://orcid.org/JDD-8719-2023)

²доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерних наук

Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)

E-mail: shilo.gn@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5020-6707>. ResearcherID: [H-1884-2019](https://orcid.org/H-1884-2019)

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА АЛЮМІНІЄВОЇ ДЕТАЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

У статті розроблено архітектуру процесу друку з використанням телекомунікаційної системи зворотного зв'язку, що вдосконалює процес адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання та дозволяє контролювати температуру під час друку за допомогою лазерів та теплової камери. У програмному забезпеченні ABAQUS проведено симуляцію процесу адитивного виробництва трьох рівнів трирівневої ієрархічної системи з урахуванням вимог до технологічності та якості отриманої деталі, таких як її геометричні розміри, залишкові напруження та збереження оптимальної швидкості виробництва. Створено оптимальну траєкторію та параметри друку для визначеної деталі. Отримані дані використано для подальшої можливості генерації автоматизованої програми для керування роботом під час процесу адитивного виробництва. Визначено залишкові напруження та можливість дефектів у виготовленій деталі.

Ключові слова: електродугове зварювання; САЕ системи; робототехніка; 3D моделювання; Abaqus; телекомунікації.

Табл.: 2. Рис.: 15. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. На сьогодні процес адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання й досі перебуває у стадії розвитку та постійного вдосконалення. Проблеми контролю розповсюдження тепла під час друку металу, що переливаються в розповсюдження залишкових напружень, потребують вирішення за допомогою використання теплових лазерних датчиків та теплокамер, а також безпосередньої симуляції процесу перед його впровадженням. Встановлення бездротових систем зворотного зв'язку контролю якості друку та розповсюдження тепла допомагають досягти більш точного інспектування процесу адитивного виробництва, знижуючи ризик появи дефектів та забезпечуючи високу якість виготовлених алюмінієвих деталей, а також полегшити та поліпшити роботу користувача із системою. Застосування таких інноваційних рішень стимулює розвиток адитивного виробництва й відкриває нові перспективи для його використання в різних галузях промисловості. Дані отримані з нових досліджень використовуються не тільки для покращення якості виробництва, але і для впровадження автоматизованих систем використання робототехніки адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Запроваджені сучасні методи вирішення проблем адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання [1-4] вказують на те, що проведення автоматизованого друку потребує подальшого вдосконалення. Для покращення якості процесу виробництва використовуються сучасні методи контролю за температурою [5-7], проте й вони не є автоматизованими. Однією з проблем під час адитивного виробництва є перекриття валиків [8-9], параметри якого залежать так само й від розповсюдження тепла між ними [10-12]. Надмірний термальний вплив без належного контролю може не тільки погіршити якість створюваної деталі але й призвести до

її тотального руйнування. Контроль температури може здійснюватися попередньо за допомогою симуляції та вибору траєкторії руху роботизованої руки під час процесу адитивного виробництва [13]. Для процесу симуляції теплового режиму друку з використанням електродугового зварювання у комп'ютерних обчислювальних програмах може використовуватися рівняння розповсюдження тепла Голдаку [14-15].

$$q_{f/r} = \frac{6\sqrt{3}f_{f/r}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{\left(\frac{3x^2}{c_{f/r}^2}\right)} e^{\left(\frac{-3y^2}{a^2}\right)} e^{\left(\frac{-3z^2}{b^2}\right)}. \quad (1)$$

Формула $Q = nVI$ визначає розповсюдження енергії і залежить від току (I), напруги (V) та коефіцієнта ефективності (n). Розміри розповсюдження тепла в еліпсоїдній формі визначаються величинами a , b і c . Частковими факторами кількості тепла є f , що вводиться на передній та задній квадрати моделі. Зауважимо, що сума двох факторів моделі дорівнює $fr + ff = 2$.

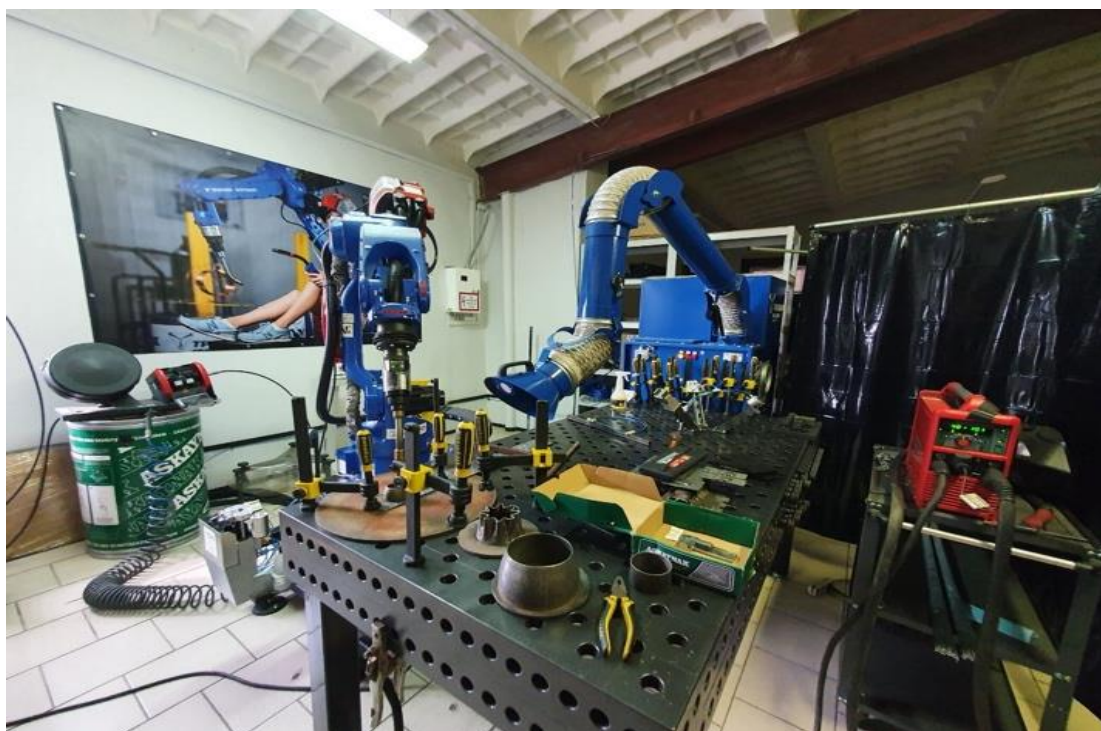


Рис. 1. Роботизована система адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання на ТОВ «Триада ЛТД Ко»
Джерело: розроблено авторами.

Попередні дослідження [16] з використанням симуляції тривірневої ієрархічної системи для процесу адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання показують можливість оптимізації процесу друку. Зокрема використанням алгоритму проведення симуляції одного з рівнів системи. Особлива увага в дослідженні приділяється порівнянню отриманих результатів залишкових напружень в різних типах валиків та температурних режимах. Це дозволяє визначити оптимальні умови для проведення процесу друку з використанням електродугового зварювання. Аналізуючи ці результати, дослідники можуть виявити найбільш ефективні параметри та засоби оптимізації, що сприятимуть поліпшенню процесу друку та підвищенню якості виготовлених виробів.

Метою роботи є вдосконалення процесу розробки алюмінієвого виробництва за допомогою адитивних технологій з використанням електродугового зварювання. Використання тривірневої ієрархічної системи для проведення симуляції можливості покращення

процесу друку трирівневої алюмінієвої деталі та проведення подальшого реального експерименту. Вибір та встановлення необхідних телекомунікаційних лазерних датчиків тепла та теплокамери до роботизованої системи. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- встановити параметри необхідної деталі;
- провести симуляцію трьох рівнів ієрархічної системи;
- за наявності проблем з температурними режимами під час симуляції віднайти спосіб їх вирішення;
- встановити можливість проведення подальшого практичного експерименту, виходячи з отриманих даних;
- обрати необхідні типи теплових лазерних датчиків та теплокамери для проведення реального експерименту;
- на основі отриманих даних встановити можливість початку процесу створення автоматизованої програми для процесу адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання.

Під час проведення симуляції можуть виникнути проблеми з тепловими режимами, зокрема, надмірне розповсюдження тепла, критичне накопичення тепла тощо. Необхідно встановити, як можна відслідковувати ці проблеми та як їх вирішити.

Виклад основного матеріалу. Можливості вдосконалення процесу виробництва за допомогою 3D-друку з використанням технології електродугового зварювання отримані з оцінки симуляційних даних температурних режимів та залишкових напружень. Для процесу симуляції алюмінієвої деталі використовується трирівнева ієрархічна модель. Обирається матеріал виробу, геометричні розміри валику, шару та стінки. Проходить оцінка міжрівневих характеристик та обрання необхідних змін для успішного закінчення процесу виробництва. Весь процес проходить за розробленим наявним алгоритмом проведення симуляції рівнів трирівневої ієрархічної системи. Після проведення симуляції здійснюється підбір необхідних апаратних частин вдосконалення процесу та безпосередньо друкується деталь.

Проект передбачає собою створення деталі для перевірки граничної міцності (рис. 2).

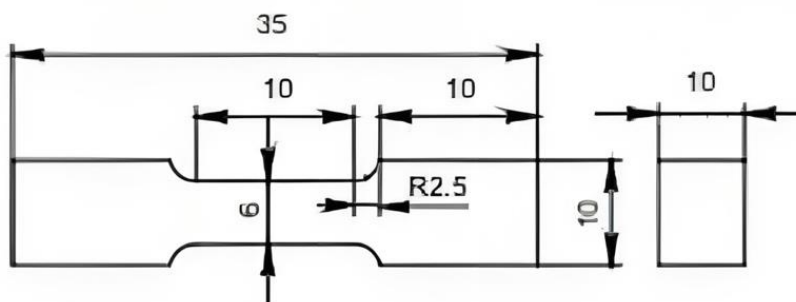


Рис. 2. Геометричні параметри деталі

Джерело: розроблено авторами.

Для отримання такої деталі попередньо необхідно надрукувати прямокутну геометричну фігуру розміром 40 мм завдовжки, 16 мм завширшки та висотою 12 мм. Після друку здійснюватиметься фінішна обробка деталі – фрезерування.

Обраний розмір валиків – 4 мм. Геометричні розміри бази – 40 мм висоти, 40 мм ширини, 200 мм довжини (рис. 3). Матеріал бази – алюміній. Матеріал друку – алюміній. Параметри друку наведені в табл. 1 та 2.

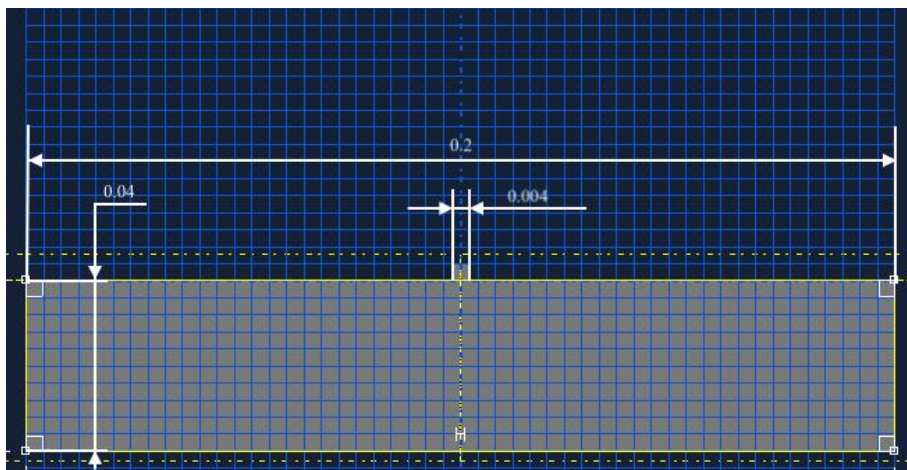


Рис. 3. Геометричний проект симуляції першого рівня трирівневої ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання
Джерело: розроблено авторами.

Результати першого рівня трирівневої ієрархічної моделі симуляції процесу адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання показують розповсюдження тепла від колокації одного зварювального валика (рис. 4).

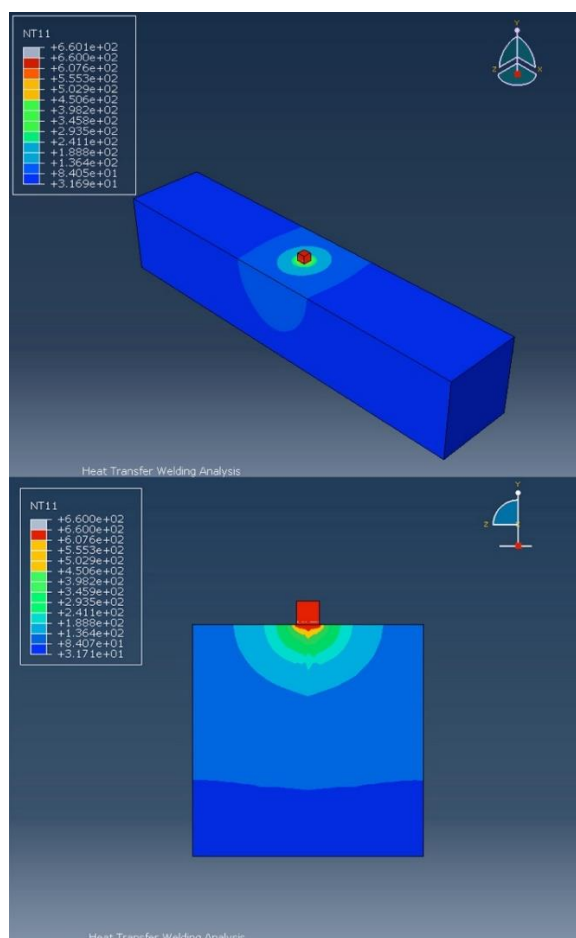


Рис. 4. Результати теплового аналізу та розповсюдження тепла першого рівня ієрархічної трирівневої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання
Джерело: розроблено авторами.

Згідно з отриманою інформацією, після проведення теплового аналізу виконується симуляція структурного аналізу для дослідження впливу тепла на структуру виготовлених виробів. У цьому контексті структурний аналіз включає оцінку залишкових напружень, які виникають у матеріалі після процесу адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання (рис. 5).

За загальними результатами аналізу першого рівня недоліків не виявлено, температура розповсюджується рівномірно. Розповсюдження залишкових напружень не перевищує норми, згідно зі значеннями допустимих величин.

Таблиця 1 – Властивості матеріалу для адитивного виробництва алюмінію

Теплопровідність		Густина	Пружність			Коефіцієнт теплового розширення		Питома теплоємність
$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$q, \text{ W/m }^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ kg/m}^3$	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{ N/m}^2$	ν	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{ }^\circ\text{C}$	$c, \text{ }^\circ\text{C}$
300	164	2750	25	724e9	0.3	300	27e-006	900
500	194		500	63.5e9		500	27.4e-006	
700	210		700	56.1e9		700	27.7e-006	
770	220		770	50e9		770	28.3e-006	

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2 – Додаткові властивості матеріалу для адитивного виробництва алюмінію

Теплопровідність	Густина	Пружність		Коефіцієнт теплового розширення
$q, \text{ W/m }^\circ\text{C}$	ρ	$\sigma, \text{ N/m}^2$	ν	$\varepsilon, \text{ }^\circ\text{C}$
204	2750	69e9	0.33	2.3e-005

Джерело: розроблено авторами.

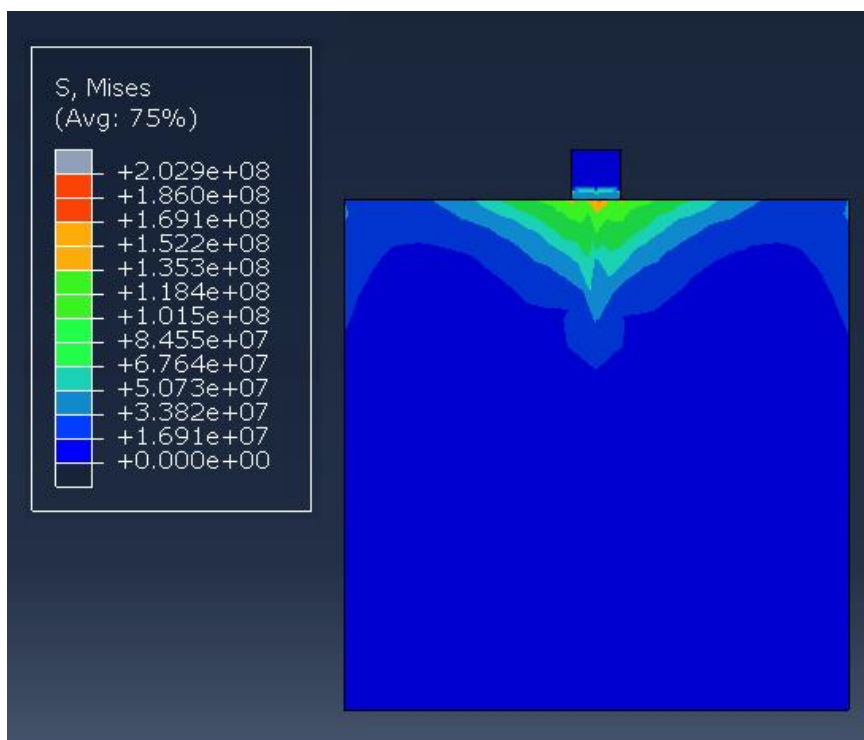


Рис. 5. Результати структурного аналізу та залишкових напружень першого рівня ієрархічної тривірвневої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

Джерело: розроблено авторами.

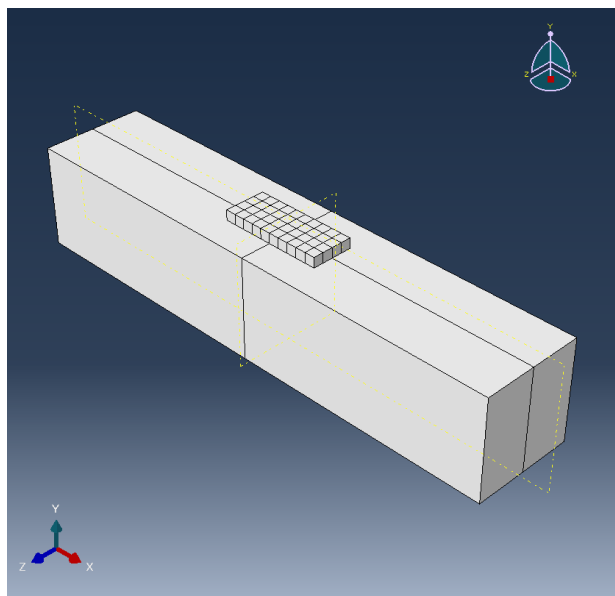


Рис. 6. Проект симуляції другого рівня тривірневої ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

Джерело: розроблено авторами.

Після отримання результатів та на базі аналізу даних першого рівня необхідно провести симуляцію другого рівня тривірневої ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання, тобто шару. Геометричні розміри шару для створення заданої завданням проекту деталі становлять: 4 мм висоти, 16 мм ширини та 40 мм довжини (рис. 6). Шар складається з 40 валиків зварювання окремо, що дислокуються один за одним на матеріал бази. Є можливість також створення одного безперервного довгого валику, проте в нашому випадку було обрано саме модель окремого нанесення.

Під час поточної симуляції шару, у якій топологія системи наноситься згідно з варіантом рис. 7, а, виникають проблеми з розповсюдженням тепла.

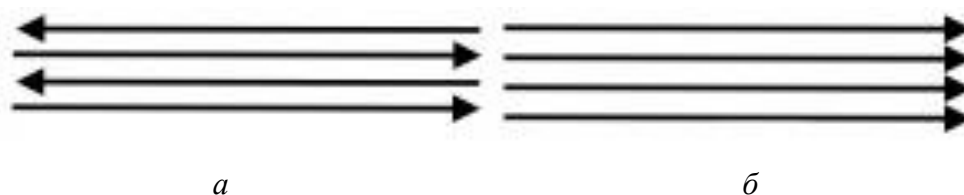


Рис. 7. Можливі траєкторії руху нанесення шару

Джерело: розроблено авторами

Уже на 12 кроці накопичена загальна температура не тільки в надрукованій на момент кроку частині шару, але й навіть температура бази досягають критичних значень, тобто переходять до рідкісного стану – стану плавлення. Уся система зазнає руйнування. Аналіз даних наведено на рис. 8. Процес симуляції завершується невдало.

Одним із можливих методів вирішення проблеми є створення нової альтернативної топології шару. Під час виробництва з використанням траєкторії друку варіанта рис. 7, б тепло розповсюджується більш рівномірно та не встигає накопичитися до критичного рівня у 12-му кроці. Однак вже на 16-му кроці загальне сумарне накопичення тепла в уже надрукованій частині шару та навіть на базі проходить позначку температури плавлення.

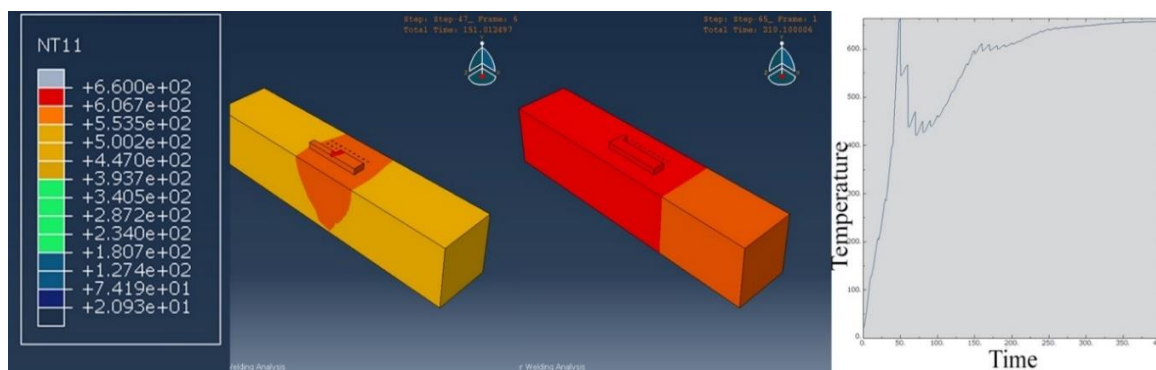


Рис. 8. Результати теплового аналізу та розповсюдження тепла другого рівня ієрархічної тривірвневої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання траєкторії нанесення шару

Джерело: розроблено авторами.

Уся система зазнає руйнування. Аналіз даних наведено на рис. 9. Процес симуляції завершується невдало.

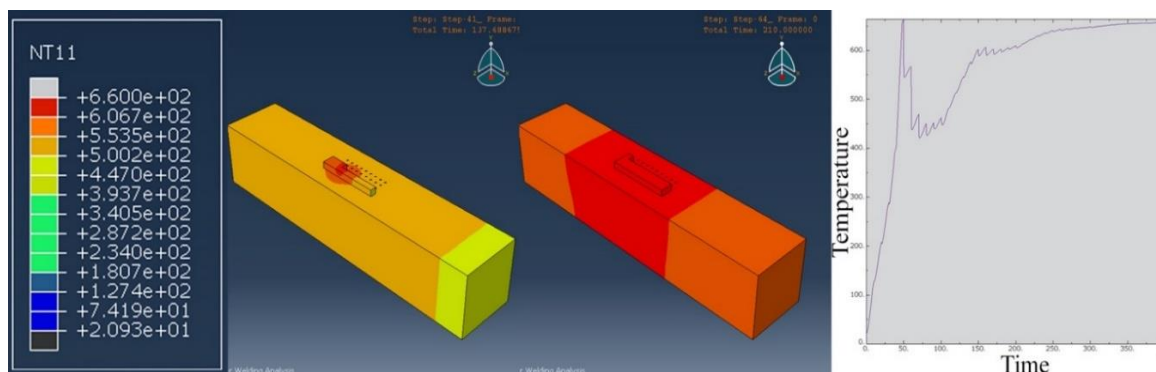


Рис. 9. Результати теплового аналізу та розповсюдження тепла другого рівня ієрархічної тривірвневої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання траєкторії нанесення шару

Джерело: розроблено авторами.

Оскільки адаптація траєкторії нанесення шару лише частково вирішує проблему критичного накопичення тепла під час друку, необхідно додати інші методи контролю розповсюдження тепла, зокрема охолодження системи. Під час завершення друку 10 валиків згідно з траєкторією нанесення шару (рис. 9), шляхом проведення декількох симуляцій було визначено температуру, до якої необхідно охолодити всю систему для подальшого проведення друку. Визначена температура охолодження становила -60°C . З результатів симуляції температурного аналізу та розповсюдження тепла другого рівня ієрархічної тривірвневої системи з використанням траєкторії нанесення шару (рис. 9) та контролю за охолодженням системи визначено, що загальне накопичення тепла під час друку не досягає критичного. Аналіз даних наведено на рис. 10. Процес симуляції завершується вдало.

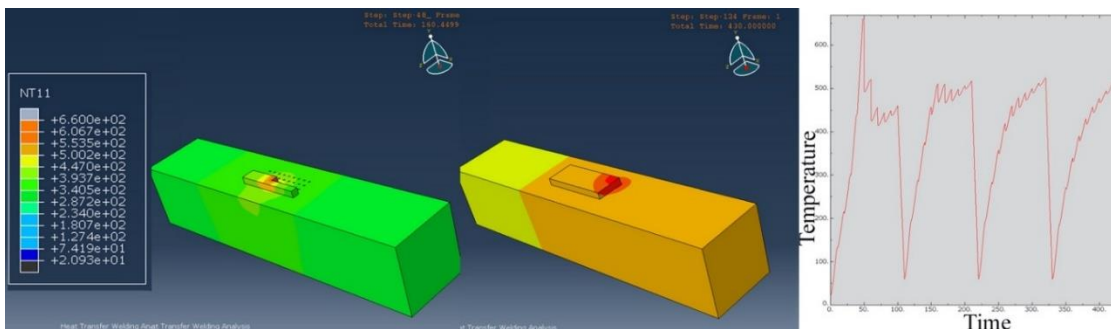


Рис. 10. Результати теплового аналізу та розповсюдження тепла другого рівня ієрархічної трирівневої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

Джерело: розроблено авторами.

З використанням отриманих даних теплового аналізу проводиться структурний аналіз шару. Отримані дані наведено на рис. 11. Найбільш вразливі ділянки знаходяться у області перекриття валиків та в зонах найбільшого температурного впливу. Результати аналізу залишкових напружень знаходяться в межах допустимих значень.

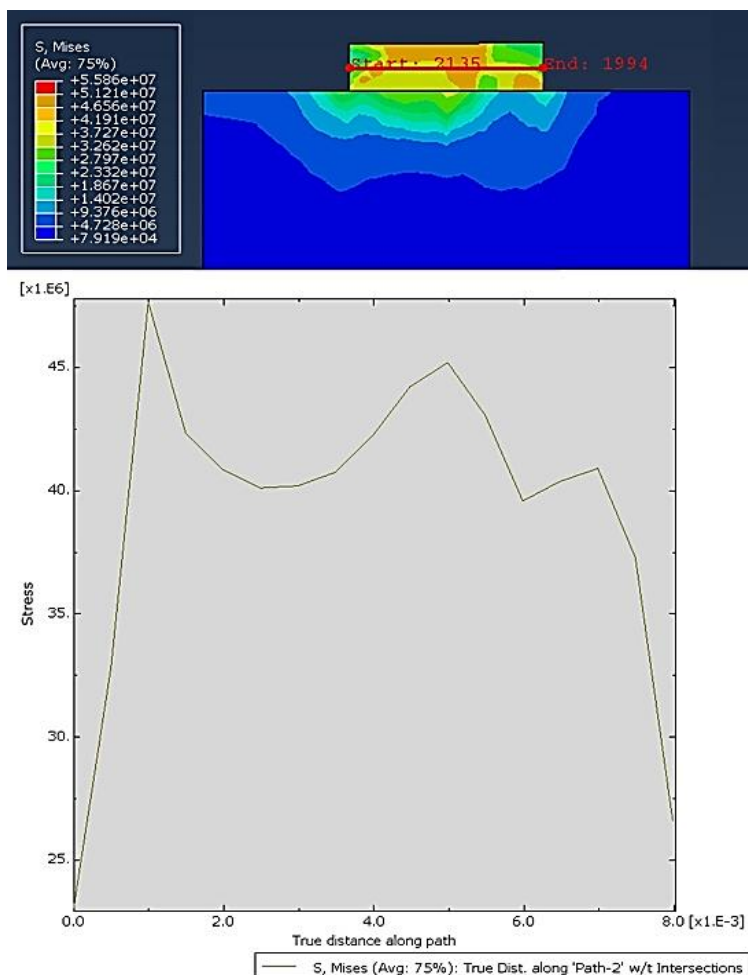


Рис. 11. Результати структурного аналізу та залишкових напружень другого рівня ієрархічної трирівневої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

Джерело: розроблено авторами.

Підсумовуючи та використовуючи отримані дані з попередньо проведених двох рівнів симуляцій тривірневої ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання розробляється проект симуляції третього рівня – стінки. Геометричні розміри стінки: 12 мм висоти, 16 мм ширини та 40 мм довжини (рис. 12). Стінка складається з 3 шарів, що в свою чергу складаються зі 120 валиків. Під час процесу друку необхідно дотримуватися встановленої під час калькуляції другого рівня моделі траєкторії руху рис. 7, б, а також дотримуватися температурного режиму: кожні 10 валиків охолоджувати систему до 60 градусів.

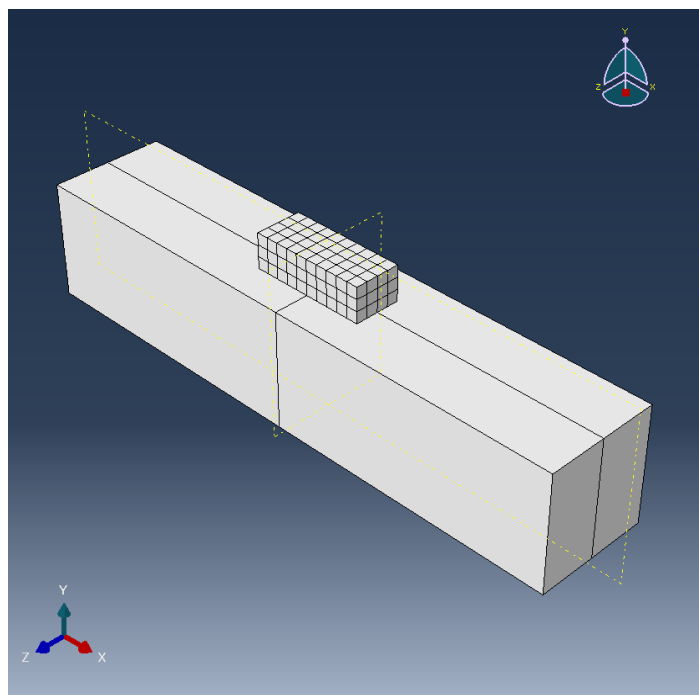


Рис. 12. Проект симуляції третього рівня тривірневої ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

Джерело: розроблено авторами.

Дані процесу симуляції теплового аналізу та розповсюдження температур третього рівня тривірневої ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання (рис. 13) показують, що процес проходить успішно, температура накопичується в межах допустимих норм, формування стінки відбувається ефективно й без значних перегрівів.

Успішне завершення теплового аналізу дозволяє провести фінальний процес симуляції – структурний аналіз стінки. Вдало обрані параметри контролю розповсюдження тепла, траєкторії нанесення матеріалу та охолодження дозволяють ефективно контролювати процес формування стінки та позитивно впливають на фінальну якість виробу. З результатів структурного аналізу рис. 13, видно, що безпосереднє доволі рівномірне розповсюдження залишкових напружень, без концентрацій в окремих зонах, не має негативного впливу на міцність деталі під час аплікації сили до неї. Змодельована деталь відповідає вимогам міцності та може витримувати зовнішні навантаження без виникнення деформацій, поломок або дефектів.

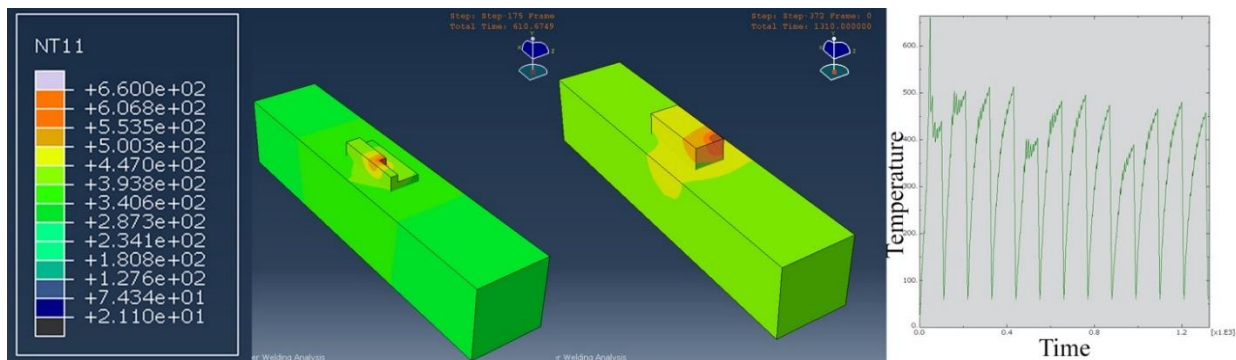


Рис. 13. Результати теплового аналізу та розповсюдження тепла третього рівня ієрархічної тривірвнєвої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

Джерело: розроблено авторами.

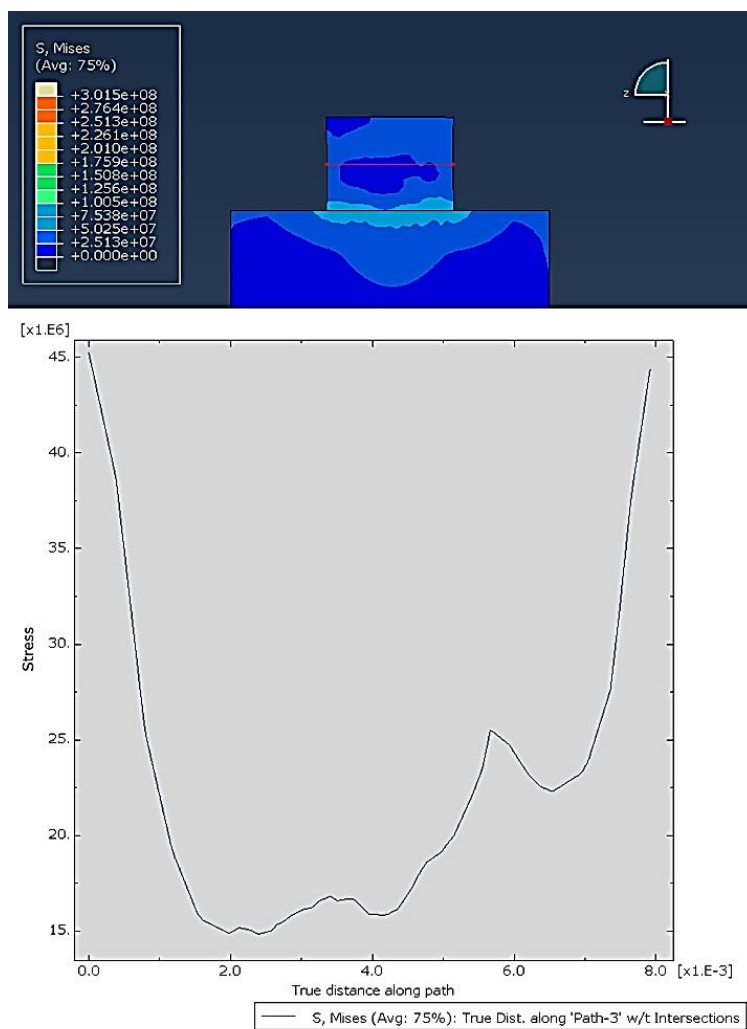


Рис. 14. Результати структурного аналізу та розповсюдження залишкових напружень третього рівня ієрархічної тривірвнєвої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

Джерело: розроблено авторами.

Отже, загальний процес симуляції адитивного виробництва алюмінієвої деталі з використанням електродугового зварювання було проведено успішно. Комп'ютерна розрахована модель деталі відповідає всім необхідним встановленим параметрам та показникам та може бути використана для стадії проведення реального фізичного експерименту.

Уже під час самого процесу друку для якісного автоматизованого виробництва та наслідування заданої топології та температурних режимів необхідно запровадити використання теплокамери та лазерних датчиків зі встановленою телекомунікаційною системою зворотного зв'язку. Для нашого випадку серед можливих варіантів використання було обрано інфрачервону камеру Bosch GIS 1000 C Professional з можливим діапазоном температур від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, що підходить для нашого випадку, у якому критична температура накопичення сягає $660\text{ }^{\circ}\text{C}$, а початкова температура була обрана $21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а також інфрачервоний датчик з операційною можливістю від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Підключені до одної телекомунікаційної системи (рис. 15), обрані пристрої передають отриману температурну інформацію до контролера і у випадку порушення попередньо заданих налаштувань для уникнення повного руйнування системи як у розглянутій вище симуляції з траєкторією нанесення шару (а), робота процесу адитивного виробництва повністю зупиняється.

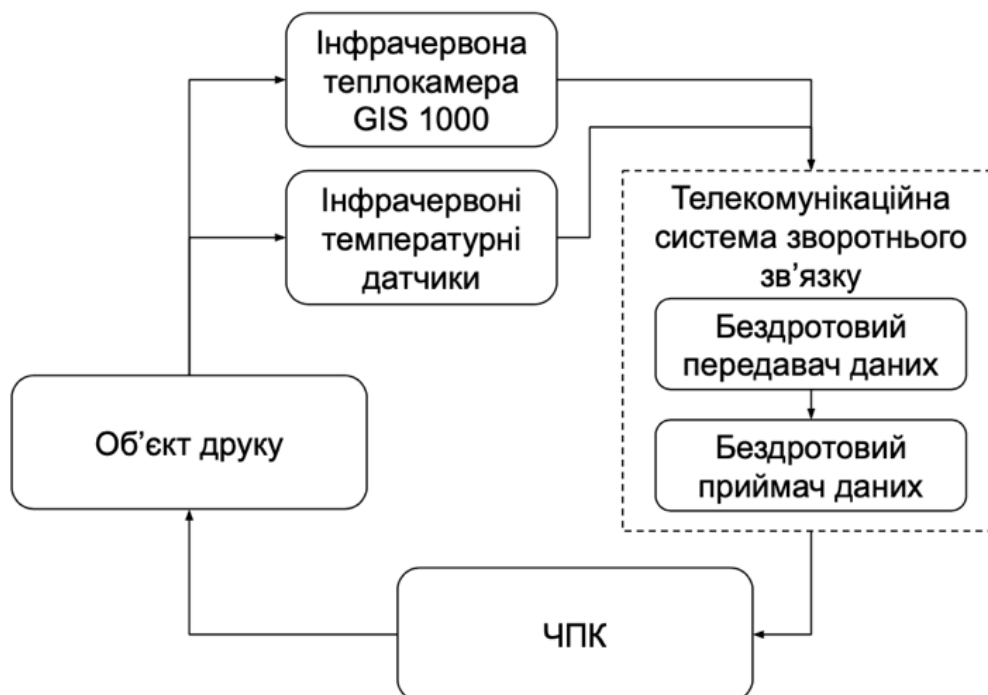


Рис. 15. Архітектура процесу друку з використанням телекомунікаційної системи зворотного зв'язку

Джерело: розроблено авторами.

Кожен із рівнів моделі буде розглянуто окремо згідно з наданими даними, проведено симуляцію та відповідно до отриманих результатів створено наступний рівень. Після проведення симуляції останнього рівня буде визначено доцільність використання обраних показників для подальшого виробництва на основі вже проведеної симуляції.

З отриманих даних під час симуляції стає зрозуміло, що обидві моделі обраних валиків підходять для процесу адитивного виробництва, зважаючи на потреби користувача, у вигляді часу виготовлення, сили струму, напруги, розповсюдження залишкових напружень, можна обрати, який саме тип остаточної деталі буде вироблено. У нашому випадку було обрано другий тип, тобто тип з використанням «великих» валиків. Після процесу

адитивного виробництва та фрезерної обробки отримана деталь розміру 5 на 10 мм та товщиною 2 мм. Процес друку було проведено з використанням лазерних датчиків та тепло камери поєднаних телекомунікаційною системою зворотного зв'язку.

Висновки. У результаті проведених досліджень було успішно створено можливість вдосконалення процесу адитивного виробництва алюмінієвої деталі з використанням електродугового зварювання. Розглянуто різні траєкторії руху нанесення шару. Розв'язано проблеми накопичення тепла у конкретному випадку друку. Створено архітектуру процесу друку за допомогою електродугового зварювання з використанням телекомунікаційної системи зворотного зв'язку. Обрано необхідні теплодатчики та теплокамеру для контролю за розповсюдженням тепла. Проведено аналіз можливості друку з використанням трирівневої ієрархічної моделі. Після проведення симуляції встановлено можливість подальшого практичного експерименту. Отримано більше необхідних даних для можливості створення автоматизованої програми з використанням теплових телекомунікаційних датчиків для процесу адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання. У подальших дослідженнях необхідно провести аналіз впливу температурних датчиків телекомунікаційної системи зворотного зв'язку на контроль виробництва та якість деталей під час процесу друку.

Список використаних джерел

1. Applications of wire arc additive manufacturing (WAAM) for aerospace component manufacturing / P. Harshita, A. Arora, G. Gopakumar, A. Patterson // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. DOI: 10.1007/s00170-023-11623-7.
2. Modelling and experimental observation of the deposition geometry and microstructure evolution of aluminum alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing / R. Geng, J. Du, Z. Wei, N. Ma // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 64. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.037.
3. Characterization of 5356 Aluminum Walls Produced by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) / M. Wieczorowski, A. Pereira, D. Carou, B. Gapinski, I. Ramirez // *Materials*. – 2023. – Vol. 16(7). – 2570. DOI: 10.3390/ma16072570.
4. Automation control system of 3d printing robotic platform with implemented wire + arc welding technology / P. Anikin, G. Shilo, R. Kulykovski, D. Molochkov // *Electrical Engineering and Power Engineering*. – 2021. – № 4. – P. 35-48. DOI:10.15588/1607-6761-2020-4-4.
5. Combine defect of the interlayer temperature with travel speed on features of thin wall WAAM under two cooling approaches / F. Teixeira, F. Scotti, V. Jorge, A. Scotti // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 126. – P. 273-289. DOI: 10.1007/s00170-023-11105-w.
6. Influence of active cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured mildsteel / A. Dash, L. Squiers, J. Avila, A. Bandyopadhyay // *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2023. – Vol. 9. DOI:10.3389/fmech.2023.1130407.
7. Jorge, V. Pyrometrical Interlayer Temperature Measurement in WAAM of Thin Wall: Strategies, Limitations and Functionality / V. Jorge, F. Teixeira, A. Scotti // *Metals – Open Access Metallurgy Journal*. – 2022. DOI: 10.3390/met12050765.
8. Chen, A profile transformation based recursive multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) / C. Chen, H. He, J. Zhou, M. Feng // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – 84 (3). – 886-901. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.042.
9. Zhang, J. The gap-filling overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-bead components / J. Zhang, Y. Xing, J. Cao // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – 123. – P. 737-748. DOI: 10.1007/s00170-022-10132-3.
10. Lee, S. CMT-Based Wire Arc Additive Manufacturing Using 316L Stainless Steel: Effect of Heat Accumulation on the Multi-Layer Deposits / S. Lee // *Metals*. – 2020. – Vol. 10 (2). – P. 278. DOI: 10.3390/met10020278.
11. Park, J. CMT-Based Wire Arc Additive Manufacturing Using 316L Stainless Steel (2): Solidification Map of the Multilayer Deposit / J. Park, S. Lee // *Metals*. – 2021. – Vol. 11(11). – P. 1725. DOI: 10.3390/met11111725.

12. Bendia, R. Multivariable closed-loop control for layer geometry in Wire-Arc Additive Manufacturing / R. Bendia, F. Lizarralde, F. Coutinho // XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. – 2021. DOI: 10.20906/sbai.v1i1.2732.

13. Development of a Multidirectional Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process with Pure Object Manipulation: Process Introduction and First Prototypes / K. Parmal, L. Oster, S. Mann, B. Corves // Manufacturing and Materials Processing. – 2021. – Vol. 5(4). – P. 134. DOI: 10.3390/jmmp5040134.

14. Development of correlation between temperature, liquid lifespan, molten pool, and porosity during Wire Arc Additive Manufacturing: A finite element approach / J. Ketha, P. Teja, A. Choudhary, R. Jain // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2022. – Vol. 38. – P. 1-15. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.05.002.

15. Effects of Vertical and Pinch Rolling Residual Stress Distributions in Wire and Arc Additively Manufactured Components / R. Tangestani, G. Farrahi, M. Shishegar, A. Mehmanparast // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2020. – Vol. 29. – P. 2073-2084. DOI: 10.1007/s11665-020-04767-0.

16. Anikin, P. Wire arc additive manufacturing three level hierarchical model / P. Anikin, G. Shilo, F. Bastos // Computer Science and Applied Mathematics. – 2023. – № 2.

References

1. Harshita, P. Arora, A., Gopakumar, G., Patterson, A. (2023). Applications of wire arc additive manufacturing (WAAM) for aerospace component manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI: 10.1007/s00170-023-11623-7.

2. Geng, R. Du, J., Wei, Z., Ma, N. (2021). Modelling and experimental observation of the deposition geometry and microstructure evolution of aluminum alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.037.

3. Wieczorowski, M., Pereira, A., Carou, D., Gapinski, B., Ramirez, I. (2023). Characterization of 5356 Aluminum Walls Produced by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Materials*. DOI: 10.3390/ma16072570.

4. Anikin, P., Shilo, G., Kulykovski, R., Molochkov, D. (2021). Automation control system of 3d printing robotic platform with implemented wire + arc welding technology. *Electrical Engineering and Power Engineering*. DOI: 10.15588/1607-6761-2020-4-4.

5. Teixeira, F., Scotti, F., Jorge, V., Scotti, A. (2023). Combine defect of the interlayer temperature with travel speed on features of thin wall WAAM under two cooling approaches. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI: 10.1007/s00170-023-11105-w.

6. Dash, A., Squiers, L., Avila, J., Bandyopadhyay, A. (2023). Influence of active cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured mild steel. *Frontiers in Mechanical Engineering*. DOI: 10.3389/fmech.2023.1130407.

7. Jorge, V., Teixeira, F., Scotti, A. (2022). Pyrometrical Interlayer Temperature Measurement in WAAM of Thin Wall: Strategies, Limitations and Functionality. *Metals - Open Access Metallurgy Journal*. DOI: 10.3390/met12050765.

8. Chen, C., He, H., Zhou, J., Feng, M. (2022). A profile transformation based recursive multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Journal of Manufacturing Processes*. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.042.

9. Zhang, J. Xing, Y., Cao, J. (2022). The gap-filling overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-bead components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI: 10.1007/s00170-022-10132-3.

10. Lee, S. (2020). CMT-Based Wire Arc Additive Manufacturing Using 316L Stainless Steel: Effect of Heat Accumulation on the Multi-Layer Deposits. *Metals*. DOI: 10.3390/met10020278.

11. Park, J., Lee, S. (2021). CMT-Based Wire Arc Additive Manufacturing Using 316L Stainless Steel (2): Solidification Map of the Multilayer Deposit. *Metals*. DOI: 10.3390/met11111725.

12. Bendia, R., Lizarralde, F., Coutinho, F. (2021). Multivariable closed-loop control for layer geometry in Wire-Arc Additive Manufacturing. *XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. DOI: 10.20906/sbai.v1i1.2732.

13. Parmal, K., Oster, L., Mann, S., Corves, B. (2021). Development of a Multidirectional Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process with Pure Object Manipulation: Process Introduction and First Prototypes. *Manufacturing and Materials Processing*. DOI: 10.3390/jmmp5040134.

14. Ketha, J., Teja, P., Choudhary, A., Jain, R. (2022). Development of correlation between temperature, liquid lifespan, molten pool, and porosity during Wire Arc Additive Manufacturing: A finite element approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.05.002.

15. Tangestani, R., Farrahi, G., Shishegar, M., Mehmanparast, A. (2020). Effects of Vertical and Pinch Rolling on Residual Stress Distributions in Wire and Arc Additively Manufactured Components. *Journal of Materials Engineering and Performance*. DOI: 10.1007/s11665-020-04767-0.

16. Anikin, P., Shilo, G., Bastos, F. (2023). *Wire arc additive manufacturing three level hierarchical model, 2*.

Отримано 20.10.2023

UDC 621.316.13

Pavlo Anikin¹, Galina Shilo²

¹PhD Student of the Department of Radio engineering and Telecommunications
Zaporizhzhia Polytechnic National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

E-mail: anikinps@zntu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6767-784X>. ResearcherID: [JDD-8719-2023](https://orcid.org/0000-0001-6767-784X)

²D.Sc., Professor of the Department of Computer Science
Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

E-mail: shilo.gn@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5020-6707>. ResearcherID: [H-1884-2019](https://orcid.org/0000-0002-5020-6707)

ENHANCEMENT OF WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING PRODUCTION OF ALUMINUM PART

The article provides original findings of the improvement of the production of the wire arc additive manufacturing of aluminum. The simulation of the process of wire arc additive manufacturing of a three-level hierarchical model was carried out, while taking into account the requirements for manufacturability and quality of the obtained part, such as its geometric dimensions, residual stresses and maintaining of the optimal production speed. During the occurrence of problems with heat distribution, various trajectories of movement and topologies were used to solve them. The optimal trajectory and print parameters are created in the form of temperature control for the specified part. Implemented the ability to use a telecommunication feedback system using telecommunication devices such as pyro camera and infrared temperature laser sensors to monitor temperature during problems detected by print simulation. The obtained data were used for the further possibility of generating an automated program for controlling the robot during the additive manufacturing process. Residual stresses and the possibility of defects in the manufactured part are determined. Based on the obtained data, the values of residual stresses and defects in the manufactured parts were determined.

Improved print topology using a three-level hierarchical system. Introducing the use of laser sensors and thermal cameras to the telecommunications system of additive manufacturing using wire arc welding with the improvement of the direct printing process by means of controlling the spread of heat.

Keywords: WAAM; CAE systems; Robotics; 3D modeling; Abaqus; Telecommunications.

Table: 2. Fig.: 15. References: 16.