

СИСТЕМИ ПЕРЕМІЩЕННЯ ДЛЯ ДУГОВОГО АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА НА БАЗІ ТИПОВОГО УСТАТКУВАННЯ

С.М. Мінаков¹, А.С. Мінаков¹, Д.В. Степанов¹, Є.П. Чвертко¹, Н.М. Стреленко¹, Д.М. Вдовиченко²,
І.М. Вдовиченко²

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37.
E-mail: e.chvertko@kpi.ua

²ІЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03130, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: maksimov@paton.kiev.ua

Електродугове адитивне виробництво набуває поширення в промисловості завдяки високій продуктивності формування деталей і можливості побудови установок з використанням традиційного зварювального обладнання – джерел живлення, механізмів подачі дроту, систем подачі газу та пальників. Однак актуальними на сьогодні залишаються проблеми, пов'язані з обов'язковою необхідністю додаткової механічної обробки деталей, отриманих методами дугового адитивного наплавлення, яка, в свою чергу, обумовлена залишковими напруженнями та деформаціями в деталі і значною щорсткістю поверхні. Окрім рішень технологічного характеру, оптимізація процесів формування деталей потребує вирішення ряду задач стосовно переміщень виробу і зварювального інструменту в процесі виробництва. У загальному випадку такі переміщення необхідно здійснювати у багатозісній системі координат із достатньо високою точністю, при цьому загальне переміщення може являти собою комбінований рух виробу та інструменту. У даній роботі докладно описано процес розробки багатозісних систем переміщення для установок дугового адитивного наплавлення. На відміну від використання в якості маніпуляторів роботизованих комплексів, установки були побудовані на базі універсального обладнання, що дозволило суттєво знизити його вартість. Необхідні для виконання завдань дугового адитивного наплавлення у захисних газах параметри були досягнуті в результаті проєктування обладнання, яке успішно пройшло випробування при адитивному наплавленні деталей типу стінка і фланець. Бібліогр. 6, рис. 7.

Ключові слова: зварювання, адитивне виробництво, дугове адитивне виробництво, наплавлення MAG, установка

Вступ. Зварювання і споріднені процеси як технології отримання нероз'ємних з'єднань на сьогодні успішно застосовують в багатьох галузях промисловості. Одним із сучасних напрямків дослідження є технології адитивного виробництва, які дозволяють отримувати деталі складної просторової форми, у тому числі градієнтні – зі змінними перерізом, товщиною і властивостями, а також виробу із багатопустотними стінками, які неможливо отримати литтям або механічною обробкою [1].

Основа будь-якої системи адитивного виробництва складають система переміщень, сировина (витратні матеріали) і джерело енергії. Їх поєднання забезпечує переміщення і нагрівання матеріалу та, відповідно, поступове формування деталі. Одним із різновидів є електродугове адитивне виробництво, в якому металевий зварювальний дріт використовують як сировину, а електричну дугу – як джерело тепла. При цьому цілком можливе використання звичайного зварювального обладнання (джерел живлення, зварювальних пальників, систем подачі дроту і захисного газу) у складі установок. У цьому полягає одна з переваг такої технології – вона може бути значно дешевшою, ніж технології адитивного виробництва, які вимагають спеціального обладнання і матеріалів [2]. Технологія дозволяє ви-

бляти повнофункціональні виробу, майже необмежені в розмірах. Досяжна швидкість наплавлення зазвичай становить 50...130 г/хв, що вище, ніж у будь-якого іншого методу адитивного виробництва, а, отже, забезпечується вища продуктивність і коротший час виконання замовлення [3].

Ключовими задачами в електродугових адитивних технологіях є забезпечення маніпуляції джерела теплоти за заданою траєкторією і мінімізація напружено-деформованого стану деталі [1]. Вирішення другої задачі, зокрема, полягає у виборі базової технології електродугового наплавлення (MAG, TIG, PAW) і в оптимізації параметрів режиму залежно від виду і складу присадкового матеріалу та від геометричної форми деталі [4, 5].

Задачі, які пов'язані з переміщеннями, в основному, полягають у програмному переміщенні пальника або деталі по трьом лінійним осям координат X , Y , Z (іноді ще додатково із задіянням осей обертання A і B). Вирішення таких задач можливе за рахунок використання у складі установок роботизованих систем або верстатів із ЧПУ в якості маніпулятора інструмента [6]. Однак вартість подібних систем є досить високою.

У даній роботі **метою** було розробити систему переміщення виробу і зварювального інструменту для

Мінаков С.М. – <https://orcid.org/0000-0001-8607-4120>, Мінаков А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-1724-3100>,
Степанов Д.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7557-6686>, Чвертко Є.П. – <https://orcid.org/0000-0003-3073-1034>,
Стреленко Н.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8571-5958>, Вдовиченко Д.М. – <https://orcid.org/0000-0002-4623-5900>
Вдовиченко І.М. – <https://orcid.org/0000-0003-1945-1015>

© С.М. Мінаков, А.С. Мінаков, Д.В. Степанов, Є.П. Чвертко, Н.М. Стреленко, Д.М. Вдовиченко, І.М. Вдовиченко, 2025

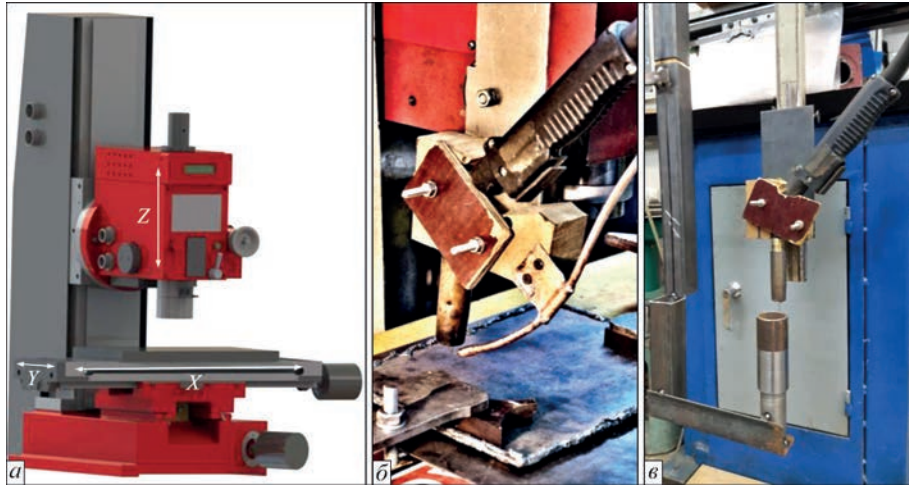


Рис. 1. Модернізований фрезерний верстат із відокремленими системами переміщення X - Y та Z : a – модель верстата DM-X3 із приводами по осям X , Y , Z ; b , c – модернізований верстат із закріпленою підложкою і зварювальним інструментом за першим (b) та другим (c) варіантами

адитивного наплавлення деталей на плоску основу робочої поверхні та на циліндричну трубу на базі універсального обладнання. У роботі використовували спосіб наплавлення MAG з присадковим дротом.

Система переміщення для адитивного наплавлення на плоску основу. Найпростішим рішенням задачі забезпечення переміщення зварювального інструменту по трьом лінійним осям X , Y , Z є застосування фрезерних верстатів, у конструкції яких передбачені відповідні механізми. На відміну від досить вартісних верстатів ЧПК, універсальні свердлильно-фрезерні верстати призначені для виконання різноманітних видів обробки та є доступними у широкій номенклатурі і за відносно помірними цінами. Однак для використання в адитивному дуговому виробництві вони потребують модернізації, зокрема заміни двигунів у приводах переміщення на крокові або на сервоприводи та забезпечення захисту деталей і механізмів верстата від зварювальних бризок.

Схему верстата із трикоординатною системою переміщення наведено на рис. 1, a . Особливістю такого конструктивного рішення є те, що переміщення столу верстата здійснюється по осям X та Y , а привод осі Z розташований окремо і переміщує фрезерну головку зі шпинделем. Це дає можливість за потреби варіювати кількість ступенів свободи виробу і зварювального інструменту, змінюючи схему їхнього закріплення.

У випадку, коли виріб закріплено на столі, а зварювальний інструмент – на головці, виріб здійснює переміщення по осям X та Y залежно від заданої форми поперечного перерізу, а зварювальний інструмент переміщується по осі Z , здійснюючи переходи між проходами. Можлива і зворотня схема, при якій зварювальний інструмент закріплений на столі і здійснює переміщення в площині XOY , а виріб здійснює переміщення по осі Z . В останньому випадку додатково необхідно приймати

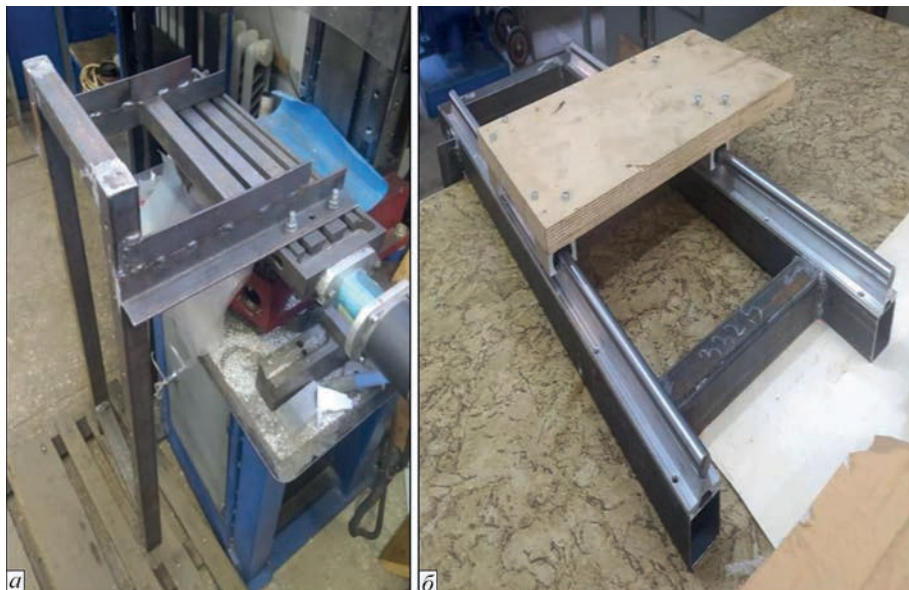


Рис. 2. Елементи механізму переміщення зварювального інструменту по осі Z : a – кронштейн; b – кронштейн із закріпленими направляючими та каретками

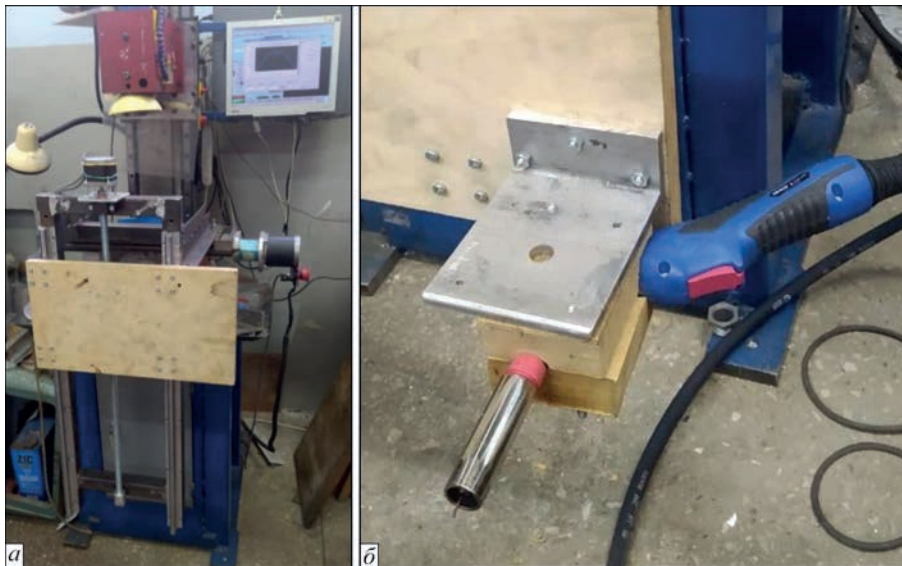


Рис. 3. Установка із трикоординатним переміщенням зварювального інструменту: *a* – система переміщення; *б* – кріплення зварювального інструменту

конструктивні рішення стосовно кріплення деталі на головці. Обидві схеми розміщення виробу і зварювального інструменту дозволяють здійснювати адитивне наплавлення виробів зі змінною формою поперечного перерізу, у тому числі, тонкостінних на плоску основу та є простими в реалізації.

Процеси електродугового наплавлення у захисних газах супроводжуються розбризуванням електродного металу. Для захисту елементів систем переміщення від бризок було розроблено відповідні конструктивні рішення.

Перший варіант (виріб переміщується в площині XOY , а пальник – по осі Z) потребує захисту напрямних верстата від бризок під час наплавлення. При цьому елементи додаткового захисту можуть бути досить громіздкими і заважати потрібним переміщенням пальника (рис. 1, *б*). Другий варіант (пальник переміщується в площині XOY , а виріб – по осі Z) дозволяє винести зону наплавлення так, щоби бризки розплавленого металу не попадали на напрямні верстата (рис. 2).

У роботі застосовували настільний фрезерний верстат DM-X3, який був встановлений на тумбі. При цьому зона наплавлення була винесена нижче верстата. Деталь, що наплавлялась, була закріплена на незалежному столі з приводом переміщення по осі Z (рис. 1, *в*). Недоліком такого конструктивного рішення є значна довжина елементів з'єднання деталі з фрезерною головкою, що негативно впливає на жорсткість з'єднання і додатково обмежує масу виробу, який наплавляється.

Для зняття описаних вище обмежень було розроблено окремий механізм переміщення по осі Z , який встановили на стіл, із приводами осей X та Y , тобто зварювальний інструмент має можливість рухатись уздовж усіх трьох осей. У лабораторній

установці граничне переміщення по осі X становить 400 мм, по осі Y – 200 мм, по осі Z – 500 мм.

Для з'єднання механізму зі столом верстата було виготовлено кронштейн, який закріпили на столі болтовими з'єднаннями (рис. 2, *a*). Конструкція кронштейна забезпечує винесення зони наплавлення нижче верстата і, завдяки чому додаткові елементи захисту напрямних від зварювальних бризок не потрібні. Лінійне переміщення здійснюється по круглих направляючих типу SBR16 завдовжки 800 мм за допомогою чотирьох кареток. Відстань між каретками вибрали таку, щоб робочий хід по осі Z складав 500 мм (рис. 2, *б*). На каретки закріпили лист фанери завтовшки 20 мм, на якому здійснювали закріплення зварювального інструменту.

Для забезпечення можливості зворотно-поступального руху кареток відносно направляючих було запропоновано два варіанти: кульково-гвинтова передача (КВП) і звичайна різьбова шпиль-

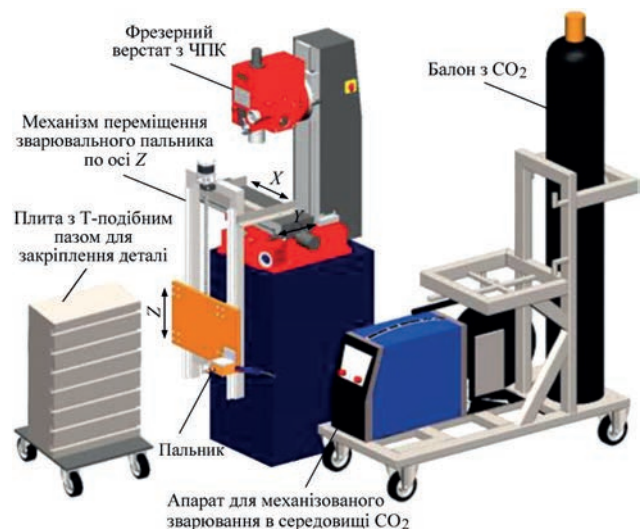


Рис. 4. Схема установки для адитивного наплавлення способом MAG із трикоординатною системою переміщення на базі фрезерного верстату

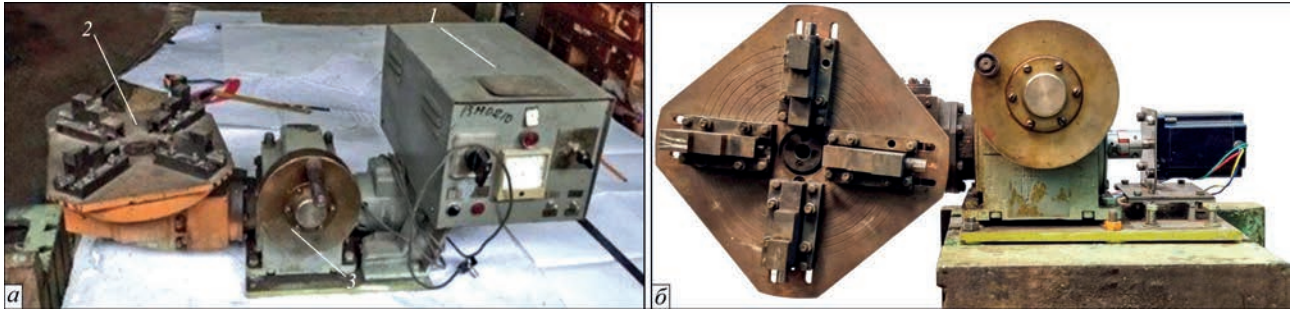


Рис. 5. Зварювальний маніпулятор М77: *а* – оригінальна конструкція (1 – блок керування, 2 – планшайба; 3 – механізм зміни кута нахилу планшайби); *б* – модернізований варіант

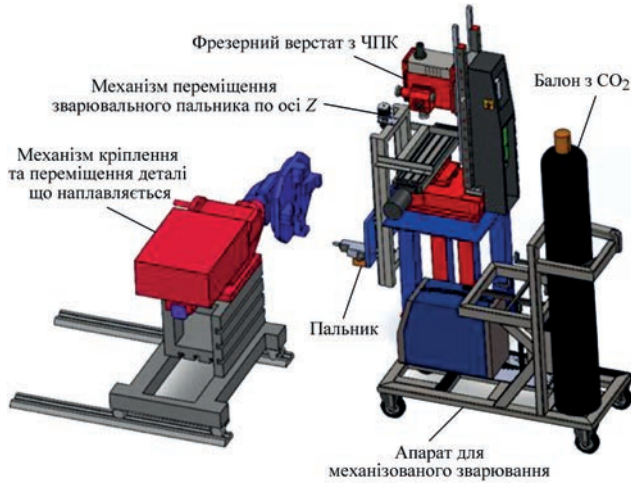


Рис. 6. Схема 4-координатної установки для адитивного наплавлення способом MAG

ка з масивною бронзовою гайкою. У модернізованій установці використали різьбову шпильку М16 з гайкою, оскільки в нашій конструкції відсутнє велике навантаження, а вага бронзової гайки і зварювального інструменту під дією сили тяжіння забезпечать постійне навантаження різьбового з'єднання та відсутність люфту.

Для надійної фіксації шпильки використали кінцеву опору ВF12, яку закріпили вгорі крон-

штейна, а кульковою опорою зафіксували різьбову шпильку внизу. В якості привода по осі Z застосували кроковий двигун Nema 23 (рис. 3, *а*). Пальник для зварювання способом MAG закріпили на листі фанери через фрезеровані накладки. Таке горизонтальне розташування дозволяє проводити наплавлення у вертикальній площині з робочою зоною 500×400 мм (рис. 3, *б*).

Основу виробу, що наплавляється, закріплювали на столі від стругального верстата з Т-подібними пазами. Стіл встановили на візку (рис. 4), при цьому розміри робочої зони в площині $ZOХ$ залишились незмінними (500×400 мм), а обмеження переміщення по осі $У$ були зняті.

Система переміщення для адитивного наплавлення на циліндричну трубу. У загальному випадку при адитивному напавленні деталей типу фланець на циліндричну трубу задля забезпечення сприятливих умов формування стінки виробу необхідно здійснювати переміщення елементів установки в системі координат із 4-ма або 5-ма осями, а саме: лінійні переміщення вздовж осей X, Y, Z , обертання виробу (вісь A) та нахил виробу (вісь B). Розширення можливостей описаної у попередньому розділі установки на базі фрезерного

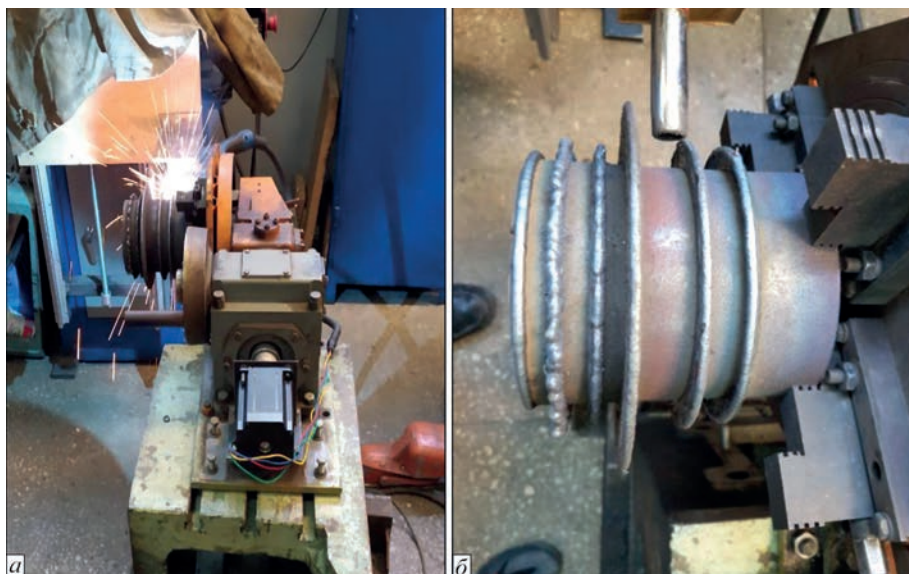


Рис. 7. Випробування 4-координатної системи переміщень для адитивного наплавлення: *а* – процес наплавлення фланця; *б* – напавлений виріб

верстата DM-X3 можливе за рахунок введення до її складу зварювального маніпулятора.

Зазвичай у зварювальних маніпуляторах використовують двигуни постійного струму. Це дозволяє змінювати швидкість обертання у широких межах, однак не дозволяє програмно керувати кутом обертання так, як це необхідно для вирішення задач адитивного виробництва.

Модернізація такого устаткування можлива шляхом встановлення замість двигунів постійного струму сервоприводів або крокових двигунів. Крокові двигуни є більш економічно доцільними та мають достатні характеристики точності.

Було модернізовано зварювальний маніпулятор M77 (рис. 5, а) із заміною двигуна постійного струму на кроковий двигун NEMA 34HS9801 (момент утримання 5,6 Н·м). Замість оригінального блоку керування для управління кроковим двигуном використовували драйвер з контролером верстата ЧПК, який, в свою чергу, був підключений до комп'ютера із спеціалізованим програмним забезпеченням.

У поєднанні з системою для трикоординатного переміщення отримали установку для 4-осьового наплавлення (рис. 6). Управління переміщень по всім осям здійснюється від одного комп'ютера. Перші три осі верстата (X , Y , Z) із ЧПК переміщують зварювальний інструмент згідно із заданою конфігурацією виробу, четверта вісь A керує швидкістю обертання та кутом повороту планшайби. Така модернізація дозволяє програмно тримати постійну швидкість наплавлення при виготовленні тіл обертання, у тому числі зі змінною формою поперечного перерізу.

Випробування модернізованого устаткування. Із застосуванням модернізованої установки (рис. 6) здійснювали адитивне наплавлення у вертикальному положенні деталей типу фланець на круглу трубу

діаметром 133 мм (рис. 7, а). Було успішно наплавлено 20 шарів загальною висотою 34 мм (рис. 7, б).

Висновки

Виготовлення деталей методами електродугового адитивного наплавлення на плоску основу і на циліндричну трубу потребує використання багатососьових систем переміщення, основою яких, зокрема, може бути модернізоване універсальне обладнання (металообробні станки, зварювальні маніпулятори та ін.).

Розроблено конструкцію та проведено випробування 3-х та 4-координатних систем переміщення для адитивного наплавлення способом MAG на базі модернізованого фрезерного станка DM-X3 та маніпулятора M77.

Список літератури/References

1. Ryabtsev, I., Fomichov, S., Kuznetsov, V. et al. (2023) Surfacing and Additive Technologies in Welded Fabrication. *Springer Nature*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-34390-2>
2. Knezović, N., Topić, A. (2018) Wire and arc additive manufacturing (WAAM) – a new advance in manufacturing. *Lecture Notes in Networks and Systems*, **42**, 65–71. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-90893-9_7
3. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H. (2015) Process planning strategy for wire and arc additive manufacturing. *Advances in Intelligent Systems and Computing, SpringerLink*, **363**, 437–450. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-18997-0_37
4. Kvasnytskyi, V., Lagodzinskyi, I. (2023) Influence of GMAW and PAW methods of additive arc surfacing and shielding gas composition on surface geometry and metal structure. *The Paton Welding J.*, **11**, 21–29. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.11.02>
5. Yehorov, Y., da Silva, L.J., Scotti, A. (2019) Balancing WAAM production costs and wall surface quality through parameter selection: A case study of an Al-Mg5 alloy multilayer-non-oscillated single pass wall. *J. of Manufacturing and Materials Processing*, **3**(2), 32. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp3020032>
6. Wu, B., Pan, Z., Ding, D. et al. (2018) A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement. *J. of Manufacturing Processes*, **35**, 127–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>

MOVEMENT SYSTEMS FOR ARC ADDITIVE MANUFACTURING BASED ON TYPICAL EQUIPMENT

S.M. Minakov¹, A.S. Minakov¹, D.V. Stepanov¹, Ye.P. Chvertko¹, N.M. Strelenko¹, D.M. Vdovychenko², I.M. Vdovychenko²

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteyskyi Ave., 03056, Kyiv, Ukraine

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: maksimov@paton.kiev.ua

Wire-arc additive manufacturing is becoming widespread in industry due to the high productivity of forming the parts and the ability to build units using traditional welding equipment, such as power sources, wire feeders, gas supply systems, and torches. However, the problems associated with the mandatory need for additional machining of parts produced by arc additive surfacing methods, which, in turn, is caused by residual stresses and deformations in the part and significant surface roughness, remain relevant today. In addition to technological solutions, optimization of part forming processes requires solving a number of problems related to movement of the product and the welding tool during production. In general, such movements need to be performed in a multi-axis coordinate system and with sufficiently high accuracy, while the total movement may be a combined movement of the product and the tool. This paper describes in detail the process of developing multi-axis motion systems for arc additive surfacing units. In contrast to the use of robotic systems as manipulators, the units were built on the basis of universal equipment, which allowed significantly reducing its cost. The parameters required to perform the tasks of arc additive surfacing in shielding gases were achieved as a result of designing equipment that has been successfully tested for additive surfacing of web and flange parts. 6 Ref., 7 Fig.

Keywords: welding, additive manufacturing, wire-arc additive manufacturing, MAG surfacing, unit

Отримано 21.10.2024

Отримано у переглянутому вигляді 20.12.2024

Прийнято 19.02.2025