

УДК 621.791

Сергій Мінаков, к.т.н., доц.; Євгенія Чвертко, к.т.н., доц.; Наталія Стреленко, к.т.н., доц.; Денис Степанов, к.т.н., доц.; Антон Мінаков, к.т.н., старший викладач, Анатолій Мініцький, д.т.н., професор Віталій Михайліченко, аспірант Роман Марчук, магістрант

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Україна

Іван Вдовиченко, Дмитро Вдовиченко

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ТА ПЕРЕВАГИ ТЕХНОЛОГІЇ WAAM ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТОНКОСТІННИХ КРИВОЛІНІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Досліджено переваги WAAM для виготовлення складних тонкостінних деталей. Порівняно методи GMAW та GTAW, обґрунтовано ефективність GTAW-процесу для забезпечення точності, чистоти швів та контролю термічного циклу при наплавленні тонкостінних криволінійних елементів.

Ключові слова: WAAM, адитивне виробництво, GTAW, тонкостінні конструкції, криволінійна геометрія.

Serhii Minakov, Yevgenia Chvertko, Nataliia Strelenko, Anton Minakov, Denys Stepanov, Anatolii Minitskyi, Vitalii Mykhailichenko, Roman Marchuk, Ivan Vdovychenko, Dmytro Vdovychenko

CONCEPTUAL FOUNDATIONS AND ADVANTAGES OF WAAM TECHNOLOGY FOR THE FABRICATION OF THIN-WALLED CURVILINEAR STRUCTURES

The advantages of WAAM for producing complex thin-walled parts are investigated. GMAW and GTAW methods are compared, justifying GTAW's efficiency in ensuring precision, weld cleanliness, and thermal cycle control for depositing thin-walled elements with curvilinear geometry.

Keywords: WAAM, additive manufacturing, GTAW, thin-walled structures, curvilinear geometry.

Виготовлення тонкостінних деталей зі складною кривизною традиційними методами субтрактивного виробництва, такими як механічна обробка (фрезерування), стикається з низкою критичних обмежень. Основними проблемами є величезні обсяги відходів матеріалу, тривалі цикли виробництва та висока ймовірність деформації деталей під час зняття шарів металу. Технологія Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), яка базується на використанні електричної дуги (GMAW, GTAW або плазмової) для плавлення дроту, пропонує принципово інший підхід. Замість видалення зайвого матеріалу, вона дозволяє створювати об'єкти методом пошарового наплавлення, що докорінно змінює підходи до проектування та виробництва великогабаритних компонентів.

Однією з ключових переваг WAAM є максимально ефективне використання сировини. Процес дозволяє отримувати вироби форми «near-net-shape» (максимально наближеної до заданої), що практично нівелює потребу у видаленні великих обсягів металу.

У субтрактивному виробництві при створенні тонких стінок часто доводиться використовувати масивні блоки металу для забезпечення жорсткості при затисканні в

інструменті. WAAM наносить матеріал лише там, де це необхідно, що є вагомою економічною та екологічною перевагою.

Використання комерційно доступного зварювального дроту як витратного матеріалу замість оригінальних металевих порошків, що застосовуються в методах SLM або EBM, суттєво знижує загальну вартість виробництва.

Завдяки поєднанню високої швидкості наплавлення та низької вартості матеріалу, собівартість великих тонкостінних деталей стає значно нижчою, ніж при механічній обробці чи інших методах 3D-друку.

Адитивне виробництво відкриває нові можливості для створення складних геометрій, які раніше вважалися неможливими для практичної реалізації. Керування траєкторією наплавлення дозволяє створювати органічні криволінійні форми, критично важливі, наприклад, для аерокосмічної та автомобільної галузей. Це дозволяє оптимізувати жорсткість конструкцій, вагу та аеродинамічні властивості, наприклад, при виготовленні ребер жорсткості літаків або корпусів резервуарів.

Швидкість наплавлення в WAAM може досягати кількох кілограмів на годину. Це дозволяє застосовувати дану технологію для створення великогабаритних структур (розміром у кілька метрів), де швидкість виробництва є вирішальним фактором. Гнучке планування траєкторії руху пальника дозволяє виконувати безперервне наплавлення вздовж контуру, що зменшує потребу у використанні додаткових допоміжних структур.

Попри можливу анізотропію мікроструктури, сучасні стратегії керування процесом дозволяють отримувати високі експлуатаційні характеристики.

Використання міжшарового охолодження, прокатки або термічної обробки допомагає керувати розміром і орієнтацією зерен металу. Для тонких стінок характерне швидке охолодження, що часто призводить до утворення дрібнозернистої, міцної структури.

Матеріал, отриманий методом WAAM, зазвичай є щільним і має низьку пористість, що забезпечує високі показники міцності та пластичності для відповідальних конструкцій.

У роботі детально проаналізували переваги методу дугового зварювання вольфрамовим електродом в інертних газах (GTAW) над напівавтоматичним зварюванням (GMAW). GTAW забезпечує надзвичайно чисті шви без бризок і шлаку, що гарантує привабливий зовнішній вигляд (ефект «стопки монет») і зменшує потребу в подальшій обробці. Використання неплавкого електрода дозволяє точно регулювати подачу тепла та присадкового матеріалу. Це забезпечує низьке тепловкладення, що мінімізує деформації та запобігає прожогам при роботі з тонкими матеріалами. Також цей метод може бути успішно застосований для зварювання алюмінію, нержавкої сталі та титану, які важко обробляти за допомогою систем з активними газами та плавким дротом.

Незважаючи на порівняно високу продуктивність GMAW, метод GTAW виграє в питаннях якості, точності та контролю термічного циклу. Це робить його найбільш доцільним для дослідження в контексті виготовлення тонкостінних криволінійних деталей як зі сталей групи 1.1 за ISO/TR 15608, так і в перспективі виокологованих.

Використання GTAW-WAAM дозволяє значно скоротити терміни виробництва та ланцюги постачання, забезпечуючи можливість швидкого прототипування та ремонту складних компонентів.

Таким чином, технологія представляє собою ефективне, економічно вигідне та гнучке рішення для сучасного промислового виробництва.