

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТА БУРОВОГО ІНСТРУМЕНТУ СПОСОБОМ АДИТИВНОГО НАПЛАВЛЕННЯ

А.С. Новодранов, О.М. Савицький

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: artur19940731@gmail.com

У наш час технологія 3D друку активно розвивається та знаходить застосування у виготовленні деталей для різних галузей промисловості. У роботі визначено переваги, недоліки, а також особливості наплавлення деталей складної форми із застосуванням імпульсної дуги та дуги постійної потужності. Досліджено чотири способи роботизованого наплавлення, серед яких – три варіації імпульсного режиму, які забезпечують високу якість наплавленого металу та дрібнозернисту структуру. Проведено випробування наплавленого металу на ударну в'язкість. Усі зразки, незалежно від способу наплавлення, показали високі показники ударної в'язкості. Виготовлення металевих деталей за допомогою адитивного наплавлення може супроводжуватися появою поверхневих дефектів у наплавлених шарах, а саме пор і тріщин. Застосування робототехнічного комплексу на базі антропоморфного робота з інтегрованою системою машинного зору дозволяє підвищити якість і продуктивність процесу наплавлення. Результати дослідження макро- та мікроструктури зразків наплавленого металу підтвердили коректність роботи системи виявлення дефектів. У результаті проведених досліджень виготовлено експериментальний зразок бурового шнеку шляхом роботизованого наплавлення із застосуванням дуги постійної потужності. Бібліогр. 13, табл. 4, рис. 6.

Ключові слова: 3D технологія, WAAM наплавлення, антропоморфний робот, система машинного зору, розпізнавання дефектів, дуга постійної потужності, імпульсна дуга

Вступ. За останні десятиліття номенклатура конструкційних матеріалів значно розширилася завдяки впровадженню нових матеріалів як металевих, так і неметалевих походження. Однак, незважаючи на це, основним конструкційним матеріалом сучасності й найближчого майбутнього є вуглецеві сталі. Це обумовлено рядом факторів: порівняно дешевизною вуглецевих сталей; високим рівнем освоєння технологій їх виробництва та обробки; широкою номенклатурою сталей з різними експлуатаційними характеристиками; можливістю покращення їх властивостей термічною та механічною обробкою. Основним технологічним процесом отримання нероз'ємних з'єднань зі сталей є зварювання та його різновид – наплавлення. За схильністю до утворення якісних зварних з'єднань (зварюваність) вуглецеві сталі поділяються на: зварювані без обмежень, обмежено зварювані та не рекомендовані для зварних конструкцій [1]. Низьковуглецеві леговані та нелеговані сталі зварюються без обмежень, обмежено зварювані – це середньовуглецеві леговані та нелеговані сталі. У свою чергу, сталі з високим вмістом вуглецю не рекомендовані для зварних конструкцій [1, 2]. Обмежено зварювані сталі вимагають застосування підігріву, термообробки після зварювання та наплавлення або використання аустенітних матеріалів. Ці технологічні прийоми не потрібні для

сталей, що зварюються без обмежень. Отримати якісні зварні з'єднання сталей, не рекомендованих для зварних конструкцій, без тріщин і крихкого руйнування вважається неможливим.

Однак результати досліджень, викладені в [4–6], свідчать, що в ІЕЗ ім. Є.О. Патона були розроблені способи, які забезпечують зварювання та наплавлення обмежено зварюваних сталей і сталей, не рекомендованих для зварних конструкцій, без підігріву та термообробки матеріалами ферито-перлітного класу (не аустенітними). Зазначені методи засновані на використанні імпульсної дуги [5] з періодичним її перериванням та повною періодичною кристалізацією зварювальної ванни. Вони забезпечують керування процесами структуроутворення в металі зварних з'єднань. Структура є основним фактором, від якого залежать властивості металу. У процесі зварювання в з'єднаннях формувалися структури з високими показниками пластичності, в'язкості та тріщиностійкості. Однак при зварюванні та наплавленні низьковуглецевих сталей ці методи не застосовувалися, а інформації щодо їх впливу на структуру та властивості металу в наукових джерелах не знайдено.

В останні десятиліття в промислово розвинутих країнах широкого застосування набули 3D технології [7–10]. Це обумовлено високою продуктивністю, якістю виробів і значним рівнем роботизації

процесів наплавлення. Багатошарове наплавлення – один з процесів, що застосовується при виготовленні металоконструкцій з використанням 3D технологій, наприклад бурового обладнання. Дугове наплавлення являє собою термічний процес з локальним високотемпературним впливом на метал і достатньо потужним тепловкладенням. При багатошаровому наплавленні під впливом зазначених чинників у попередньо наплавленому металі відбуваються структурні перетворення, зміна напруженого стану та теплофізичних параметрів. Все це в сукупності може призводити до погіршення тепловідводу із рідкої зварювальної ванни. У результаті збільшується тривалість перебування в температурному інтервалі крихкості [2] або кристалізації [3], посилюються ліквідаційні процеси [2] і зростає вірогідність утворення гарячих тріщин. Надмірне перебування твердого металу попередньо наплavlених шарів в області високих температур може призвести до його перегріву, росту зерна, що негативно впливає на показники в'язкості металу. Результатом є крихке руйнування в процесі експлуатації виробу. Одним з напрямків, що забезпечить попередження небезпеки утворення вказаних дефектів, може бути застосування імпульсної дуги.

Метою дослідження був аналіз способів наплавлення, зокрема імпульсною дугою та дугою постійної потужності, з подальшим вибором найбільш придатного способу для виготовлення фрагменту бурового інструменту з урахуванням впливу кожного розглянутого способу наплавлення на структуру та в'язкість наплавленого металу, а також забезпечення відсутності поверхневих дефектів.

Для цього необхідно було вирішити низку завдань, а саме: обґрунтувати вибір обладнання для вирішення поставленої задачі; дослідити якість формування наплавленого металу та його структури; проаналізувати вплив імпульсної дуги та дуги постійної потужності на ударну в'язкість наплавленого металу.

Обладнання, матеріали та методика проведення експериментів. Для забезпечення об'єктивності експериментальної частини дослідження необхідно звести до мінімуму вплив людського фактора на результати експериментів. Тому обладнання повинно забезпечувати максимальний рівень автоматизації процесу наплавлення. З обладнанням для наплавлення дугою постійної потужності проблем не виникало. Не виникає проблем і з обладнанням для імпульсно-дугового зварювання дугою змінної потужності, тобто коли періодично змінюється потужність дуги без її переривання. У наявності широкий вибір авто-

матизованого зварювального обладнання для реалізації вказаних способів наплавлення, яке випускається серійно. Для зварювання та наплавлення імпульсною дугою з періодичним перериванням дуги та періодичною повною кристалізацією зварювальної ванни обладнання не знайдено. У період 1990–2005 рр. таке обладнання розроблялося в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, але через економічні негаразди його серійне виробництво не було розпочато. Тому для вирішення цієї проблеми був застосований робототехнічний комплекс (РТК) (рис. 1, а) на базі антропоморфного робота Fanuc ARC Mate 100iC/7L. Програмне забезпечення робота дозволяє запрограмувати його на виконання наплавлення імпульсною дугою за різними технологічними алгоритмами. Суттєвою перевагою автоматизації процесу наплавлення є мінімізація впливу людського фактора на виробництво, навіть до його повного виключення. До основних причин виникнення дефектів наплавлення відносяться: невірно обрана технологія наплавлення, порушення роботи зварювального обладнання, неякісні або невірно вибрані зварювальні матеріали та інші фактори. Оскільки на даний час неможливо забезпечити повністю бездефектний процес наплавлення, то ймовірність утворення поверхневих дефектів значною мірою залежить від досконалості технології наплавлення та якості зварювальних матеріалів. У разі несвоєчасного виявлення таких дефектів може відбуватися утворення аналогічних дефектів у наступних шарах, що може спричинити погіршення експлуатаційних характеристик виробу. Під час автоматизованого наплавлення за допомогою робототехнічного комплексу сопло пальника поступово забруднюється зсередини внаслідок потрапляння бризок. Це призводить до погіршення газового захисту зони зварювання, що, у свою чергу, може спричинити появу пор у металі наплавленого шару. Частково дану проблему можливо вирішити застосуванням станції автоматичного очищення пальника, що суттєво знизить ймовірність появи пор, але не гарантує їх повну відсутність. Наявність тріщин після наплавлення, наприклад зносостійких шарів із використанням високоміцного дроту, може призвести до руйнування виробу в процесі експлуатації. Наплавлення зносостійких шарів супроводжується підвищенням твердості та міцності наплавленого шару, проте одночасно робить його більш крихким. Це обумовлено значною кількістю вуглецю та легуючих елементів, таких як хром, молібден і ванадій, у зварювальному дроті. У типових системах роботизо-

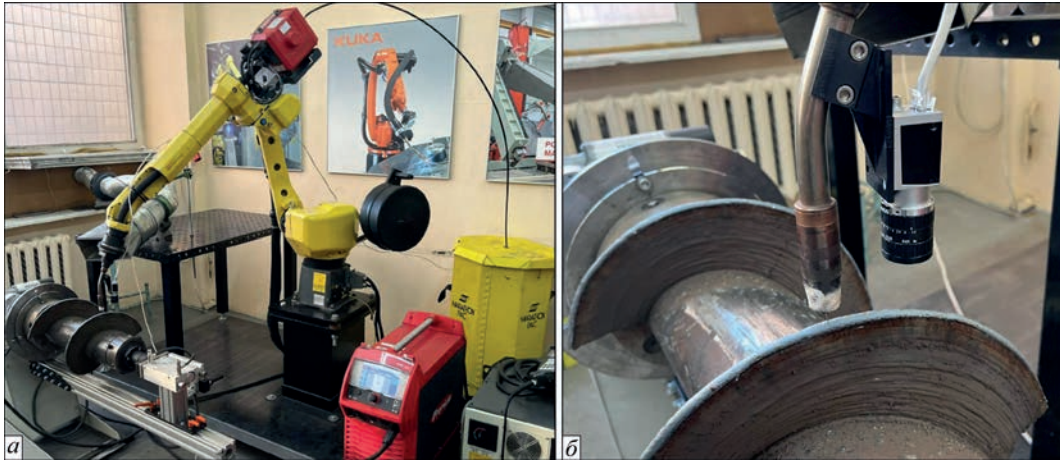


Рис. 1. Робототехнічний комплекс: а – загальний вигляд; б – система машинного зору

ваного наплавлення оператор виконує функцію візуального контролю якості наплавленого шару, що може призвести до пропуску деяких дефектів, особливо на довгомірних деталях. З метою недопущення пропуску поверхневих дефектів зварювальний робот оснащено системою машинного зору (рис. 1, б), що дало змогу здійснювати контроль наявності дефектів у наплавленому шарі. Апаратна частина системи складається з кольорової швидкісної GigE камери Basler acA1920-48gc, жорстко закріпленої на пальнику на спеціальному кріпленні, та контролера обробки зображень. Програмна частина системи технічного зору використовує алгоритм попередньо навченої згорткової нейронної мережі з архітектурою YOLOv5. Для навчання використано власний датасет (набір зображень), представлених у вигляді двовимірних кольорових зображень, що містять поверхневі дефекти, а саме пори й тріщини. Розмір навчальної вибірки склав близько 600 зображень. Нейронну мережу навчено за методом контрольованого машинного навчання. У зв'язку з обмеженим обсягом зображень для навчання було застосовано метод аугментації даних, який передбачає створення змінених версій зображень шляхом геометричних і кольорових перетворень. За результатами нав-

чання отримано модель нейронної мережі, здатну виявляти та класифікувати поверхневі дефекти, що виникають під час адитивного наплавлення металевих деталей. Тривалість процесу навчання становила 150 епох. Сканування поверхні наплавленого шару відбувалося після завершення процесу наплавлення під час остигання шару, щоб не витратити додатково виробничий час [13].

Для проведення дослідження було виконано наплавлення основного металу чотирма різними способами із застосуванням низьковуглецевого низьколегованого дроту суцільного перерізу Esab OK Aristo Rod 12.50 діаметром 1,2 мм, хімічний склад якого наведено в табл. 1. У якості захисного газу використовувалася суміш 85 % Ar + 15 % CO₂.

Перший спосіб передбачав наплавлення в імпульсному режимі з повною періодичною кристалізацією зварювальної ванни, без коливань електрода. Алгоритм полягав у наступному: в імпульсі – зупинка пальника та наплавлення, у паузі – переривання дуги та переміщення пальника на фіксовану відстань вздовж траєкторії наплавлення. Кожний наступний прохід починався з точки початку попереднього [11].

Другий спосіб був майже аналогічний до першого, за винятком чергування напрямку вектору

Таблиця 1. Характеристики зварювальних дротів для наплавлення

Спосіб	Марка дроту	Твердість, HRC	Тип дроту	Діаметр дроту, мм	Хімічний склад, %							
					C	Si	Mn	Cr	W	Co	Mo	V
Дріт для наплавлення основних шарів металу												
1-4	Esab OK Aristo Rod 12.50	-	Суцільний	1,2	0,10	0,72	1,11	-	-	-	-	-
Дроти для наплавлення зносостійких шарів металу												
1	Esab OK Autrodur 56 GM	50...60	Суцільний	1,6	0,40...0,50	2,70...3,30	≤0,80	8,0-10,0	-	-	-	-
2	Esab OK Tubrodur 53 GM	50...55	Порошковий	1,6	0,4	1,1	1,1	1,8	8,0	2,0	0,4	0,4
3	Esab OK Autrodur 58 GM	58...60	Суцільний	1,2	1,04	1,82	1,87	0,48	-	-	-	-
4	Esab OK Autrodur 58 GM	58...60	Суцільний	1,2	1,04	1,82	1,87	0,48	-	-	-	-

наплавлення. Кожний наступний прохід починався з точки закінчення попереднього, що дозволило зменшити просідання шарів у кінцевій точці наплавлення [11, 12].

Третій спосіб також передбачав наплавлення в імпульсному режимі. На відміну від першого та другого способів, його алгоритм полягав у наступному: в імпульсі відбувалося наплавлення під час переміщення пальника, а в паузі – переривання дуги та зупинка. Наплавлення виконувалося із круговими коливаннями електрода. Кожний наступний прохід починався з точки закінчення попереднього [11, 12].

Четвертий спосіб передбачав наплавлення дугою постійної потужності з круговими коливаннями електрода. Кожний наступний прохід починався з точки закінчення попереднього [11, 12].

У табл. 2 і 3 наведено параметри режимів наплавлення основних і зносостійких шарів металу [11, 12]: I – зварювальний струм; V_{WF} – швидкість подавання дроту; U – напруга дуги; F – частота коливань; A – амплітуда коливань; τ_i – тривалість імпульсу горіння дуги; τ_n – тривалість паузи горіння дуги; V_R – швидкість переміщення пальника; Δ – крок переміщення пальника.

Усі чотири способи наплавлення передбачали охолодження металу між проходами до температури 70 °С. Після наплавлення основних шарів металу заввишки 130 мм виконувалося наплавлення зносостійких шарів металу. Наплавлення виконувалося тими ж способами та за умов, аналогічних до наплавлення основних шарів металу. Характеристики та хімічний склад зносостійких дротів наведено в табл. 1. Висота зносостійких шарів складала 10 мм.

Для порівняння продуктивності наплавлення всіма чотирма способами проводилися вимірювання часу, необхідного для виконання одного проходу (наплавлення одного шару) за допомогою електронного секундоміра. Під час наплавлення імпульсними методами з періодичним перериванням дуги на один прохід витрачалося 158 с, тоді як при наплавленні дугою постійної потужності – лише 68 с.

Таблиця 2. Параметри режимів наплавлення основних шарів металу

Спосіб, №	I , А	V_{WF} , м/с	U , В	F , Гц	A , мм	τ_i , с	τ_n , с	V_R , мм/с	Δ , мм
1	160	6	26	–	–	1	2	4	6
2	160	6	26	–	–	1	2	4	6
3	154	5,3	26	2	0,5	1	2	4	6
4	154	5,3	26	2	0,3	–	–	4	–

Таблиця 3. Параметри режимів наплавлення зносостійких шарів металу

Спосіб, №	I , А	V_{WF} , м/с	U , В	F , Гц	A , мм	τ_i , с	τ_n , с	V_R , мм/с	Δ , мм
1	200	3,5	30	–	–	1	2	4	6
2	220	4,0	30	–	–	1	2	4	6
3	154	5,3	26	2	0,5	1	2	4	6
4	154	5,3	26	2	0,5	–	–	4	–

З наплавленого металу вирізалися заготовки для виготовлення зразків, які використовувалися для дослідження макро- та мікроструктури, а також випробувань на ударну в'язкість. Металографічні дослідження проводилися на оптичному мікроскопі Neophot-32 з різними рівнями збільшення. Визначення розміру зерна проводили шляхом порівняння зі шкалами ДСТУ 8972:2019 «Метод виявлення та визначення величини зерна». Процентне співвідношення фаз вираховували планіметричним методом з використанням квадратно-сітчастого окуляра мікроскопа POLYVAR. Твердість металу вимірювали за методом Віккерса, за допомогою твердоміра М-400 фірми Лесо. Навантаження складало 10 Н (1 кг), час прикладення навантаження 10 с. Цифрові зображення структур різних ділянок наплавлення та металу ЗТВ одержані за допомогою фотокамери Olympus C-500.

Випробування на ударну в'язкість проводилися на зразках з круглим (Ми 47) і гострим надрізом (Ми 50 тип 11). Заготовки для виготовлення зразків вирізалися за наступною схемою. Два зразки кожного типу – вздовж шарів наплавлення та один поперек. Надрізи на зразках, вирізаних вздовж наплавлених шарів, розмічалися таким чином, щоб забезпечити удар у верхній і боковій площинах наплавлення.

Отримані результати та їх аналіз. Наплавлений метал по всій висоті наплавлення формується без дефектів. Пори, напливи, тріщини, несплавлення та зашлаковування відсутні (рис. 2). Крім цього, метал має щільну, дрібнозернисту, однорідну структуру. У верхній частині зразків чітко виділяється зносостійкий шар.

Детальний аналіз макрошліфів металу показує, що при наплавленні імпульсною дугою шари кристалізації фактично не проявляються (рис. 2, а–в). Метал має дрібнокристалічну, близьку до монолітної, структуру. При наплавленні дугою постійної потужності, навпаки, шари кристалізації проявляються чітко (рис. 2, з). Такі відмінності можна пояснити тим, що при наплав-

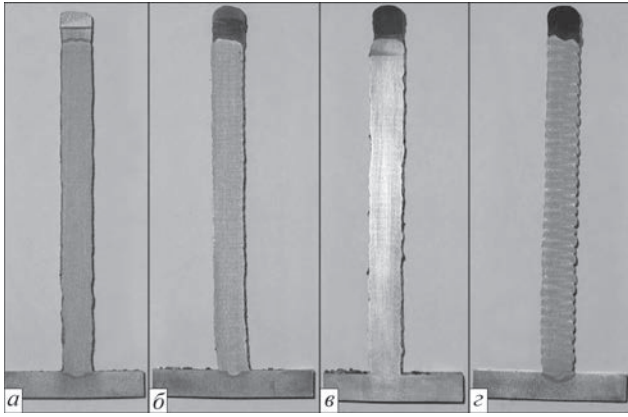


Рис. 2. Макрошліфи металу, наплавленого способами: *a* – першим; *б* – другим; *в* – третім; *г* – четвертим

ленні дугою постійної потужності циклічне чергування нагріву та охолодження металу відбувається за рахунок послідовного наплавлення шарів. При наплавленні імпульсною дугою циклічне чергування нагріву та охолодження відбувається також у межах одного проходу шляхом чергування імпульсів і пауз горіння дуги. Крім цього, при наплавленні імпульсною дугою відбувається періодична повна кристалізація ванни, що також сприяє подрібненню кристалітів [2–6].

Результати металографічних досліджень наведено на рис. 3. Вони показують, що структура низьковуглецевого металу, наплавленого усіма чотирма способами, являє собою суміш фериту з перлітом. Кількість фериту коливається в межах 80,75...89,25 %, відповідно процентне співвідношення перліту складає 19,25...10,75 %. Розміри зерен відповідають 7...10 балам за шкалами

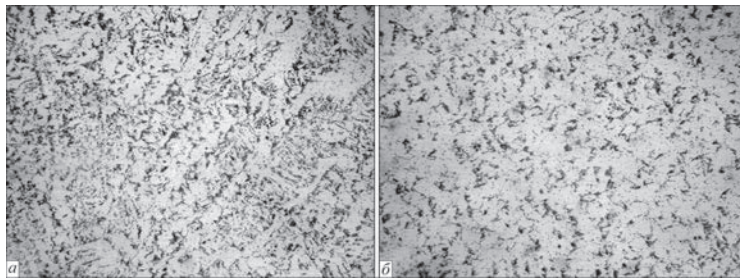


Рис. 3. Ферито-перлітна мікроструктура наплавленого низьковуглецевого металу ($\times 500$): *a* – 80,75 % фериту і 19,25 % перліту; *б* – 89,25 % фериту і 10,75 % перліту

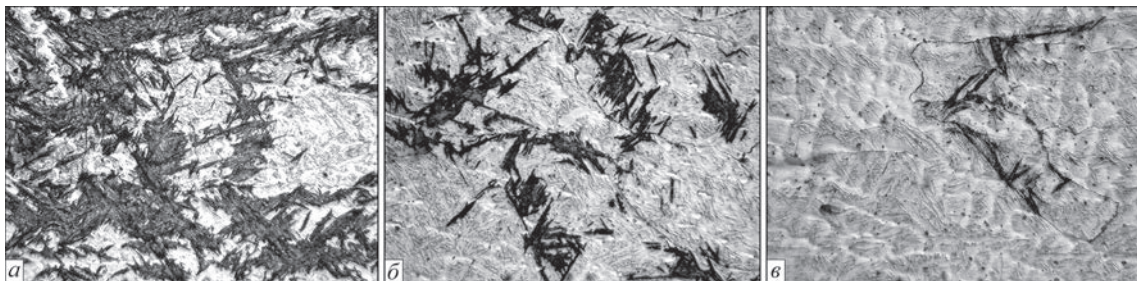


Рис. 4. Мартенсито-бейнітна мікроструктура наплавленого зносостійкого металу ($\times 500$): *a* – на границі з низьковуглецевим металом, 82,6 % нижнього бейніту і 17,4 % мартенситу; *б* – у центрі зносостійкого шару, 71,5 % нижнього бейніту і 28,5 % мартенситу; *в* – у верхній частині наплавлення, 1 % бейніту і 99 % мартенситу

ДСТУ. Твердість шару наплавлення становить 1890...1950 HV_{10} .

Мікроструктура зносостійкого наплавлення має структуру дрібногочастого мартенситу та нижнього бейніту. Співвідношення фазових складових змінюється за висотою наплавлення – біля границі з низьковуглецевим металом 82,6 % нижнього бейніту і 17,4 % мартенситу (рис. 4, *a*). У центральній частині – 71,5 % нижнього бейніту і 28,5 % мартенситу (рис. 4, *б*). Далі по висоті наплавлення кількість нижнього бейніту зменшується до 1 % (рис. 4, *в*). Твердість нижнього бейніту 4420...4640 HV_{10} , твердість дрібногочастого мартенситу досягає 6130...6360 HV_{10} , а більш узагальнена твердість складає 5590...6150 HV_{10} . Незважаючи на вміст мартенситу в мікроструктурі наплавленого зносостійкого шару, у всіх чотирьох способах тріщини в металі відсутні.

Результати випробувань на ударну в'язкість низьковуглецевого наплавленого металу наведено в табл. 4. Випробування проведено за температури навколишнього середовища +20 °С. Видно, що метал, наплавлений усіма чотирма способами, характеризується високими показниками ударної в'язкості за KCU та KCV , які близькі за своїми значеннями. Це пояснюється структурою металу, яка являє собою суміш перліту та фериту з переважаючим вмістом фериту.

Таким чином, проведені дослідження показали, що всі чотири застосовані в роботі способи наплавлення забезпечують близькі результати металографії, тобто мікроструктури, та процентний



Рис. 5. Наплавлений фрагмент бурового шнека

вміст їх складових, якість наплавленого основного та зносостійкого шарів. Однак наплавлення дугою постійної потужності має суттєву перевагу перед наплавленням імпульсною дугою. Воно за-

безпечує продуктивність наплавлення приблизно в 2,3 рази вищу за наплавлення імпульсною дугою з періодичним перериванням дуги. Це пояснюється відсутністю паузи горіння дуги. Результати дослідження макро- та мікроструктури підтвердили коректність роботи системи технічного зору на базі нейронної мережі YOLOv5, а саме – повну відсутність пор і тріщин у наплавлених шарах. Для оцінки якості навчання та класифікації обчислено метрики усередненої точності (mAP), а також точності (Precision) та повноти (Recall) [13]. Отримані значення становили: mAP = 89,8 %, Precision = 80,5 %, Recall = 89,4 %. За результатами дослідження розглянутих способів наплавлення для виготовлення експериментального фрагмента бурового шнека обрано спосіб роботизованого на-

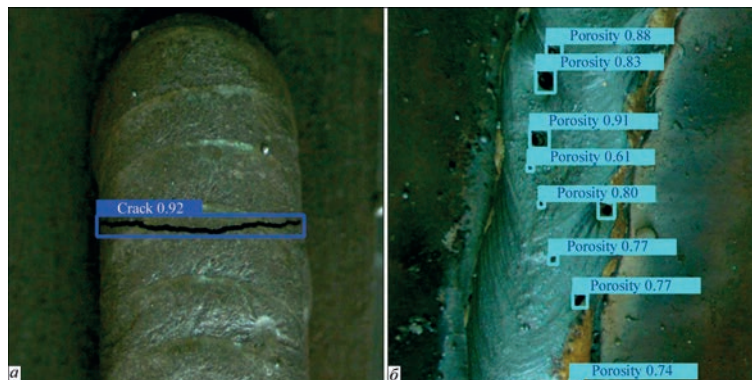


Рис. 6. Результат розпізнавання поверхневих дефектів: а – поперечна тріщина; б – пори

Таблиця 4. Результати випробувань зразків наплавленого металу на ударну в'язкість

Спосіб наплавлення	Тип зразка	Форма надрізу	Напрямок удару	KCU, Дж/см ²	KCV, Дж/см ²
№ 1	Ми 47	Круглий	Вздовж наплавлення, удар зверху	283,2	–
			Вздовж наплавлення, удар збоку	306,0	–
			Поперек наплавлення	343,0	–
	Ми 50 тип 11	Гострий	Вздовж наплавлення, удар зверху	–	212,9
			Вздовж наплавлення, удар збоку	–	230,3
Поперек наплавлення			–	245,1	
№ 2	Ми 47	Круглий	Вздовж наплавлення, удар зверху	308,0	–
			Вздовж наплавлення, удар збоку	322,0	–
			Поперек наплавлення	290,2	–
	Ми 50 тип 11	Гострий	Вздовж наплавлення, удар зверху	–	255,9
			Вздовж наплавлення, удар збоку	–	262,4
Поперек наплавлення			–	249,2	
№ 3	Ми 47	Круглий	Вздовж наплавлення, удар зверху	308,0	–
			Вздовж наплавлення, удар зверху	310,36	–
			Вздовж наплавлення, удар збоку	312,39	–
			Поперек наплавлення	338,64	–
	Ми 50 тип 11	Гострий	Вздовж наплавлення, удар зверху	–	271,64
Вздовж наплавлення, удар збоку			–	256,19	
Поперек наплавлення			–	275,30	
№ 4	Ми 47	Круглий	Вздовж наплавлення, удар зверху	348,8	–
			Вздовж наплавлення, удар збоку	349,4	–
			Поперек наплавлення.	305,0	–
	Ми 50 тип 11	Гострий	Вздовж наплавлення, удар зверху	–	254,0
			Вздовж наплавлення, удар збоку	–	265,1
			Поперек наплавлення	–	266,5

плавлення дугою постійної потужності, а результат представлено на рис. 5.

Результати роботи навченого алгоритму нейронної мережі YOLOv5 на експериментальних зразках для перевірки коректності розпізнавання із зазначенням класу дефекту та значення впевненості (confidence) наведено на рис. 6.

Висновки

1. У роботі обґрунтовано доцільність застосування робототехнічного комплексу при багатошаровому наплавленні деталей складної форми в захисних газах. Оснащений системою технічного зору, РТК забезпечує своєчасне виявлення поверхневих дефектів у наплавлених шарах, що дозволяє організувати повністю автоматизоване адитивне виробництво. Коректність роботи системи виявлення дефектів підтверджується результатами дослідження макро- та мікроструктури наведених зразків.

2. При багатошаровому роботизованому наплавленні всі розглянуті чотири способи забезпечують високу якість металу без тріщин, пор, несплавень і зашлаковувань, у металі формується дрібнозерниста структура (7...10 балів).

3. Перевагою наплавлення імпульсною дугою є подвійне термоцикування шляхом циклічної зміни імпульсів і пауз, а також почергового наплавлення шарів металу, що забезпечує практично монолітну структуру. Однак при цьому продуктивність наплавлення порівняно з дугою постійної потужності знижується приблизно у 2,3 рази.

4. Наплавлений метал має високі показники ударної в'язкості ($283,2 \leq KCU \leq 349,4$ Дж/см², $212,9 \leq KCV \leq 245$ Дж/см²).

Список літератури/References

1. Sorokin, V.G. (1989) *Data base of steels and alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Paton, B.E. (1974) *Technology of the fusion electric welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Sterenbogen, J.A., Petrov, P.F. (1979) The influence of the crystallization temperature range on the tendency of steels to form crystallization cracks during welding. *Avtomaticheskaya Svarka*, 7, 10–13 [in Russian].
4. Nazarchuk, A.T. (1997) The influence of portion-discrete formation of seams on the thermal cycle of arc fusion welding. *Avtomaticheskaya Svarka*, 5, 13–17 [in Russian].
5. Nazarchuk, A.T. (2000) Improvement of process of consumable electrode welding with an intermittent arc. *The Paton Welding J.*, 7, 28–31.
6. Nazarchuk, A.T., Snisar, V.V., Demchenko, E.L. (2003) Portioned heat input as a method to control structure of the weld and HAZ metal. *The Paton Welding J.*, 12, 34–37.
7. ASTM-International, ASTM Standard F2792- 12 (2012) *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*.
8. Anuj V. Dongaonkar, Rajesh M. Metkar (2018) Reconstruction of Damaged Parts by Integration Reverse Engineering (RE) and Rapid Prototyping (RP). *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 159–171. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-0305-0_14
9. Shah, A., Aliyev, R., Zeidler, H., Krinke, S. (2023) A review of the recent developments and challenges in wire arc additive manufacturing (WAAM) process. *J. Manuf. Mater. Process*, 7, 97. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7030097>
10. Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M., Santos, T.G., Oliveira, J.P. (2019) Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12, 1121. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12071121>
11. Shapovalov, E.V., Novodranov, A.S., Vashchenko, V.M., Savytskyi, O.M., Klishchar, F.S. (2024) Robotic complex for multi-layer surfacing by periodic arc and control of surface defects of the deposited metal. *Avtomatichne Zvariuvannya*, 6, 43–50 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2024.06.07>
12. Shapovalov, E.V., Novodranov, A.S., Vashchenko, V.M., Savytskyi, O.M., Topchev, D.D. (2025) Specifications of using intermittent action and constant power arcs in 3D welding technologies. *Avtomatichne Zvariuvannya*, 2, 43–50 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2025.02.06>
13. Shapovalov, E.V., Novodranov, A.S. (2025) Applying neural network technologies for quality control in robotic surfacing. In: *Proc. of the VIIIth Intern. Conf. on Welding and Related Technologies*, Yaremche, Ukraine, 7–10 October 2024, 154–157. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003518518-31>

AUTOMATION OF THE MANUFACTURING PROCESS OF A DRILLING TOOL FRAGMENT USING ADDITIVE DEPOSITION METHOD

A.S. Novodranov, O.M. Savytskyi

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: artur19940731@gmail.com

Nowadays, 3D printing technology is actively developing and is used in the manufacture of parts for various industries. This paper outlines the advantages, limitations, and characteristics of surfacing complex-shaped parts using pulsed arc and constant power arc methods. Four robotic surfacing approaches were investigated, including three variations of the pulsed arc mode, which provided high-quality deposited metal and a fine-grained structure. The deposited metal was tested for impact toughness, and all samples demonstrated high impact toughness regardless of the surfacing method. However, the additive surfacing of metal parts may lead to surface defects such as pores and cracks in the deposited layers. The use of a robotic system based on an anthropomorphic robot with an integrated machine vision system enhances both the quality and productivity of the surfacing process. The analysis of macro- and microstructures of the deposited metal specimens confirmed the effectiveness of the defect detection system. As a result of the study, an experimental drilling auger was successfully manufactured via robotic surfacing using a constant power arc. 13 Ref., 4 Tabl., 6 Fig.

Keywords: 3D technology, WAAM deposition, anthropomorphic robot, machine vision system, defect recognition, constant power arc, pulsed arc

Отримано 25.04.2025

Отримано у переглянутому вигляді 19.06.2025

Прийнято 08.10.2025