

РОБОТОТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ БАГАТОШАРОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ДУГОЮ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ ТА КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ

Є.В. Шаповалов, А.С. Новодранов, В.М. Ващенко, О.М. Савицький, Ф.С. Клішар

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

У роботі розглянуті особливості застосування робототехнічного комплексу на базі антропоморфного робота Fanuc ARC Mate 100iC/7L для реалізації багатошарового наплавлення дугою періодичної дії. Показано, що хоча інверторне джерело зварювального струму Fronius TPS 320i за своїми технічними характеристикам не може забезпечити періодичне зменшення теплової потужності дуги до нульового рівня з частотою 0,2...0,5 Гц, однак технологічні можливості робота при відповідному програмуванні здатні забезпечити імпульсно-дуговий процес у вказаному діапазоні частот. Крім цього робот, оснащений системою машинного зору, дає змогу під час охолодження чергового наплавленого шару металу проводити контроль наявності поверхневих дефектів. Проведені дослідження макрошліфів, а також результати металографічних досліджень засвідчили високу якість формування наплавленого металу. У наплавленому металі формується практично монолітна дрібнозерниста структура (8...10 балів зерна) з високими показниками ударної в'язкості та пластичності при достатньо високій міцності. Наведене свідчить про доцільність застосування робототехнічних комплексів для багатошарового наплавлення та реалізації 3D технологій із застосуванням дугового зварювання в захисних газах. Бібліогр. 14, табл. 5, рис. 6.

Ключові слова: 3D технологія, дуга періодичної дії, структура металу, система машинного зору, робототехнічний комплекс

Вступ. Стійкою тенденцією розвитку сучасного виробництва матеріалів є забезпечення високої якості виробів у поєднанні з підвищенням продуктивності виробничих процесів. Один з напрямків вирішення цієї задачі – 3D технології, які за останні десятиліття набули широкого розповсюдження в різних галузях виробництва промислово розвинутих країн [1, 2]. Це обумовлено рядом їх переваг над традиційними виробничими процесами. 3D технології характеризуються високими можливостями автоматизації та програмування. Вони зводять до мінімуму непродуктивні витрати матеріалів та відходів виробництва, які необхідно переробити або утилізувати, що повинно позитивно вплинути на собівартість виробів.

У машинобудуванні за допомогою 3D технологій виготовляються вироби із різних матеріалів [3, 4], зокрема й метали. Габарити цих виробів, залежно від функціонального призначення, можуть варіюватися в широких межах: від міліметрів до кількох десятків метрів, а маса – від грамів до сотень кілограмів і навіть до кількох тонн.

Для реалізації 3D технологій при виготовленні металоконструкцій найоптимальнішим є дугове наплавлення плавким електродом у захисних газах. Це обумовлено рядом наступних переваг, таких як:

- можливість реалізації в усіх просторових положеннях з гарантованим захистом зони наплавлення та якісним формуванням наплавленого металу;
- практично повна відсутність розбризкування при використанні газових сумішей на основі інертного газу;
- мінімальна кількість шлаків, що важливо при багатошаровому наплавленні;
- широка номенклатура матеріалів для зварювання та наплавлення, а також зварювального обладнання;
- можливість автоматизації процесів зварювання та наплавлення.

Найпоширенішими матеріалами для створення металоконструкцій різного призначення є сталі, в основному вуглецеві. У процесі нагріву та охолодження при наплавленні вони змінюють свій агрегатний стан від твердого до рідкого і навпаки. У твердому стані в них відбуваються структурні перетворення: змінюються розміри зерен і фазовий склад металу [5–7]. У процесі всіх цих перетворень у сталях формується кінцева структура, яка визначає їх механічні властивості, експлуатаційну надійність і довговічність конструкцій. Тому при реалізації 3D технологій із застосуванням дугового наплавлення необхідно контролювати процеси

Шаповалов Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-5063-9556>, Новодранов А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3380-3745>,
Ващенко В.М. – <https://orcid.org/0009-0008-1476-3689>, Савицький О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-2605-9647>,
Клішар Ф.С. – <https://orcid.org/0009-0008-6561-6064>

© Є.В. Шаповалов, А.С. Новодранов, В.М. Ващенко, О.М. Савицький, Ф.С. Клішар, 2024

формування структури наплавленого металу, тобто процеси плавлення і кристалізації металу, а також структурних перетворень на макро- і мікрорівнях. Це обумовлює актуальність роботи.

Дослідження проблем контролю структурних перетворень і формування структури сталей при зварюванні проводились під керівництвом Д.А. Дудко та Ф.А. Вагнера. Результати досліджень викладені в [8–13] і показують, що одним із методів вирішення проблеми є імпульсно-дуговий процес. При зварюванні неплавким електродом в аргоні для керування процесами структурних перетворень у твердому металі достатньо періодично зменшувати теплову потужність дуги [9, 10] до мінімального значення, при якому ще підтримується дуга, а зварювальна ванна кристалізується на 90 % свого об'єму.

При зварюванні плавким електродом за рахунок лише періодичного зменшення теплової потужності дуги до мінімуму не можливо досягти аналогічного впливу на об'єм кристалізації зварювальної ванни. Для підтримання стабільного дугового процесу і переносу електродного металу при діаметрі дроту 1,2 мм необхідний струм 120...130 А. Це у 24...26 разів більше, ніж при зварюванні неплавким електродом, при якому стабільна дуга підтримується при струмі 5 А. Крім цього, при зварюванні неплавким електродом пауза може тривати безкінечно довго, а під час паузи переміщення пальника може бути припинено. При зварюванні плавким електродом дугою змінної потужності тривалість паузи навіть при мінімально можливому зварювальному струмові обмежена величиною 1,0...1,5 с. Це обумовлено плавленням і переносом електродного металу, який накопичується в рідкій ванні. Це різко погіршує умови та якість формування наплавленого металу. Тому ванна за час паузи встигає кристалізуватися приблизно на 10...15 %. Внаслідок цього зварювання плавким електродом з періодичним зменшенням теплової потужності дуги не може суттєво вплинути на кінетику структурних перетворень у зварних з'єднаннях, а, відповідно, і на формування їх структури та властивостей. У зв'язку з цим зварювання плавким електродом вимагає повної періодичної кристалізації зварювальної ванни [13], що можливо лише при зварюванні дугою періодичної дії.

Робототехнічний комплекс здатен з високою точністю підтримувати задані параметри режиму наплавлення (зварювання): швидкість наплавлення (зварювання), швидкість подачі дроту та напругу дуги, а, відповідно, і зварювальний струм. Крім цього, робототехнічний комплекс зводить до мініму-

му вплив людського фактора. Це повинно забезпечувати якість і стабільність формування наплавленого металу від шару до шару, а також позитивно впливати на структуру металу. Інтеграція системи машинного зору в робототехнічний комплекс дає змогу звести до нуля ймовірність пропуску поверхневих дефектів, таких як пори у наплавлених шарах.

Враховуючи наведене, метою роботи було виявлення технологічних можливостей промислового робота при реалізації багат шарового наплавлення імпульсно-дуговим способом з періодичним контролем поверхневих дефектів. При цьому необхідно було вирішити ряд завдань:

- виявлення можливості реалізації наплавлення дугою періодичної дії без застосування спеціалізованого обладнання;
- дослідження якості формування наплавленого металу;
- дослідження особливостей формування його макро- і мікроструктури;
- дослідження механічних властивостей наплавленого металу, а також оцінка відповідності твердості та зносостійкості шару заявленим паспортним даним.

Обладнання, матеріали та методика проведення експериментів. До складу робототехнічного комплексу входив антропоморфний робот Fanuc ARC Mate 100iC/7L (рис. 1, а) та інверторне джерело зварювального струму Fronius TPS 320i (рис. 1, б). Зв'язок джерела струму з роботом здійснюється через спеціальний контролер. Робот оснащено механізмом подачі зварювального дроту. У шосту ланку робота встановлено пальник, на якому закріплена система машинного зору, створена на базі нейромережевих алгоритмів і призначена для виявлення та класифікації поверхневих дефектів, які виникають під час адитивного наплавлення, а саме – пор.

Процес наплавлення виконувався дротами фірми Esab (Швеція), технічні характеристики та хімічний склад яких наведено в табл. 1. Дріт Esab OK Aristo Rod 12.50 – низьковуглецевий низьколегований, за своїм хімічним складом близький до дроту Св 08Г2С і до сталі 09Г2С. Дріт Esab OK Autrodur 56 GM – середньовуглецевий, легований хромом і призначений для зносостійкого наплавлення. Заявлена паспортна твердість наплавленого шару 50...60 HRC.

Наплавлення виконувалось таким чином, щоб габаритні розміри наплавлених шарів точно відповідали спроєктованій 3D моделі (рис. 2) для мінімізації відходів під час механічної обробки. Засто-

Таблиця 1. Характеристики дротів для виконання наплавлювальних робіт

Марка дроту	Тип дроту	Діаметр дроту, мм	Хімічний склад, %			
			C	Si	Mn	Cr
Esab OK Aristo Rod 12.50	суцільного перерізу	1,2	0,1	0,72	1,11	-
Esab OK Autrodur 56 GM	суцільного перерізу	1,6	0,40...0,50	2,70...3,30	≤0,80	8,0...10,0



Рис. 1. Роботизований комплекс для багат шарового наплавлення: а – робот Fanuc ARC Mate 100iC/7L; б – джерело струму Fronius TPS 320i Pulse з контролером

совувався імпульсний режим (дугою періодичної дії) з повною періодичною кристалізацією зварювальної ванни без коливань електрода за спеціальним алгоритмом.

В імпульсі – зупинка пальника та наплавлення, в паузі – переривання дуги та переміщення пальника. В якості захисного газу застосовувалась газова суміш 85 %Ar + 15 %CO₂. Кожний наступний прохід починався з точки початку попереднього, при цьому пальник підіймався на висоту, визначену за допомогою датчика дотику та програмної опції Touch Sense. Між напавленням шарів відбувалось охолодження до температури нижче 80 °С.

Таблиця 2. Параметри режиму наплавлення

Тип наплавлення	I, A	Швидкість подачі дроту, м/с	U, В	τ _i , с	τ _n , с	Швидкість переміщення пальника, мм/с	Крок переміщення пальника, мм
Основні шари металу	60	6	27...28	1	2	4	6
Зносостійке наплавлення	90...200	3,5	29...30	1	2	4	6

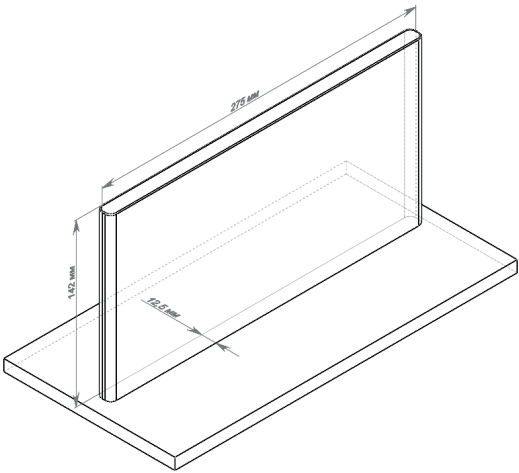


Рис. 2. 3D модель зразку для наплавлення
Довжина напавленого шару 275 мм (45 імпульсів). Здійснено 75 проходів загальною висотою 142 мм (рис. 3, а). Ширина напавленого металу складала 12,5 мм. Параметри режиму наплавлення наведено в табл. 2. Якісне формування напавленого металу забезпечувалась шляхом точного позиціонування пальника робота, тобто точного відтворення заданої траєкторії наплавлення, в межах ± 0,03 мм.

Після досягнення висоти напавлених шарів 130 мм виконувалось напавлення зносостійким дротом суцільного перерізу Esab OK Autrodur 56 GM діаметром 1,6 мм (табл. 1). Напавлення виконувалась аналогічно алгоритму, наведеному вище. Виконано 6 проходів заввишки 12 мм (рис. 3, б).

З напавленого металу вирізалися заготовки для виготовлення зразків для:

- механічних випробувань на ударну в’язкість і розтяг;
- вивчення макроструктури та мікроструктури;
- дослідження твердості зносостійкого шару.

Випробування на ударну в’язкість проводились на зразках з круглим надрізом (Ми 47), із гострим надрізом (Ми 50 тип 11). Заготовки для виготовлення зразків вирізалися за наступною схемою. Два зразки кожного типу вирізалися вздовж шарів напавлення, а один – впоперек. Надрізи на зраз-

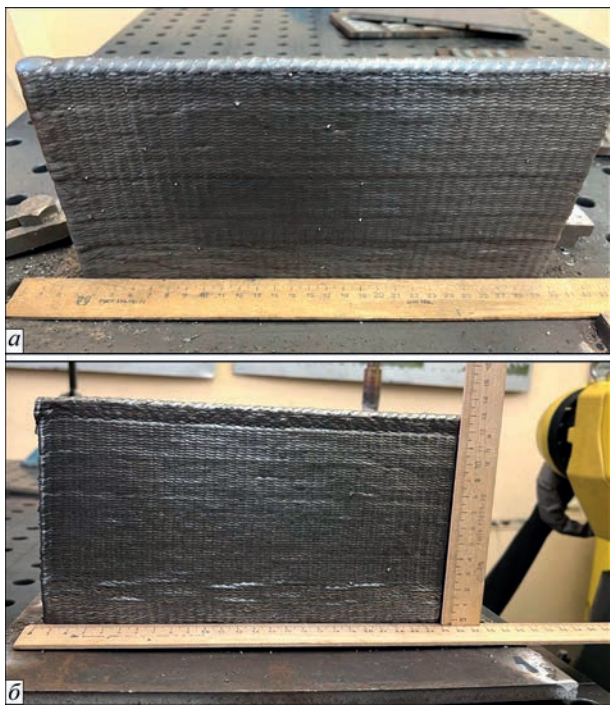


Рис. 3. Загальний вигляд напавленого зразка: *а* – низьковуглецевим низьколегованим дротом Esab OK Aristo Rod 12.50 (висота 130 мм); *б* – зносостійким дротом Esab OK Autrodur 58 GM (висота 12 мм)

ках, вирізаних вздовж напавлених шарів, розмічались таким чином, щоб забезпечити удар у верхній і боковій площинах напавлення. Випробування проводились при температурі + 20 °С.

Випробування на розтяг проводилися на зразках Ми 12 тип 1. Заготовки для зразків вирізалися вздовж і впоперек шарів напавлення.

Металографічні дослідження проводилися за стандартною методикою оптичної металографії. Визначались розміри зерна в напавленому металі та його фазовий склад.

Твердість зносостійкого шару вимірювали за методом Роквелла на приладі ТК 2м 441 за шкалою С з навантаженням 150 кгс за допомогою алмазного індентора.

Отримані результати та їх аналіз. Для реалізації напавлення або зварювання дугою періодичної дії необхідне спеціалізоване джерело зварювального струму, яке забезпечує можливість періодичного зменшення теплової потужності дуги до нульового рівня з частотою 0,2...0,5 Гц. Також потрібен спеціалізований механізм подачі дроту, який забезпечує періодичне зменшення швидкості подачі до нуля з частотою 0,2...0,5 Гц. При цьому старт і зупинка механізму подачі дроту повинні бути практично миттєвими, що можуть забезпечити серводвигуни, які застосовуються в сучасному зварювальному обладнанні. Але технічними характеристиками джерела струму Fronius TPS 320i Pulse такий режим функціонування не передбачений. Однак, як

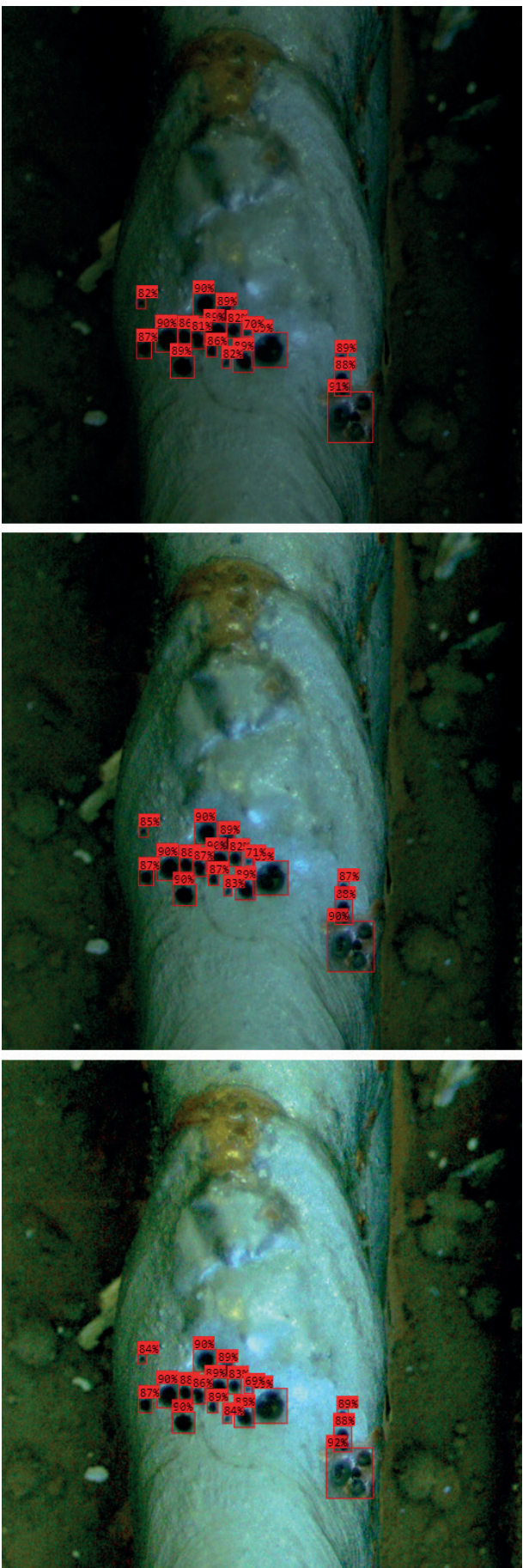


Рис. 4. Результат розпізнавання поверхневих пор в напавленому шарі за різної інтенсивності освітлення

показали результати досліджень, функціонування комплексу обладнання в режимі дуги періодичної дії здатні забезпечити програмні можливості робота Fanuc ARC Mate 100iC/7L.

Розрахунок і програмування траєкторій наплавлення здійснювалось у спеціалізованому програмному забезпеченні Fanuc Roboguide. Застосовано апаратно-програмну опцію Touch Sense для визначення поточної просторової орієнтації і висоти наплавленого за один прохід шару. Отримані дані використовуються для подальшої корекції зварювальної траєкторії за допомогою контактного датчика. Перевага застосування опції Touch Sense полягає у дотриманні однакового вильоту електрода на кожному шарі.

Система машинного зору складається з апаратної і програмної підсистем. До апаратної підсистеми відноситься промислова кольорова швидкісна GigE камера та контролер обробки кадрів. Камера жорстко закріплена на пальнику робота, що забезпечує калібровку її системи координат відносно системи координат робота. Система машинного зору використовує модель згорткової нейронної мережі YOLO-NAS. Для навчання мережі отримано набір з 485 двовимірних кольорових зображень, які містили дефектні ділянки наплавлених шарів. Навчання моделі тривало 300 епох. За результатами навчання отримано задовільні кількісні показники якості виявлення та класифікації дефектів. Результати розпізнавання поверхневих пор на поверхні наплавленого шару із різним показником інтенсивності освітлення представлено на рис. 4. Під час сканування дефектних зон наплавленого шару визначено, що зміна інтенсивності освітлення несуттєво впливає на параметр достовірності виявлення поверхневих дефектів. Це пов'язано з оптимально підбраною моделлю нейронної мережі, а також високою ефективністю її навчання.

Система виконує сканування поверхні шару після наплавлення під час його охолодження, що не вимагає додаткових витрат робочого часу. У випадку виявлення поверхневих дефектів під час сканування наплавленого шару система інформує оператора шляхом виводу інформації про дефектні ділянки та їх розташування на монітор у вигляді стоп-кадру. Таким чином, інтеграція системи машинного зору в робототехнічний комплекс з метою виявлення поверхневих дефектів є доцільною. У процесі виконання багатошарового наплавлення система машинного зору виявляла дефектні ділянки, що забезпечило відсутність поверхневих дефектів типу пора у наплавленому металу. Це було підтверджено при дослідженні макрошліфів (рис. 5).

Отриманий зразок по всій висоті наплавлення формується без дефектів. Пори, напливи, тріщини, несплавлення та зашлакування відсутні, що доводить ефективність роботи системи машинного зору. Крім цього, видно, що метал має щільну, дрібнозернисту та однорідну структуру. Шари кристалізації фактично не проявляються, що свідчить про практично монолітну структуру. При наплавленні кожного наступного шару відбувалася термічна обробка попередньо наплавлених шарів. У верхній частині зразка чітко виділяється зносостійкий шар. У ньому досить чітко виділяються шари кристалізації. У нижній частині зразка – чітко виявлена зона термічного впливу. Форма проплавлення характерна для зварювання в суміші газів $Ar + CO_2$. Глибина проплавлення складає 1,5...2,0 мм, що обумовлено порівняно невеликим зварювальним струмом (табл. 2).

Результати металографічних досліджень наведено на рис. 6. Вони показують, що структура наплавленого металу являє собою суміш фериту з перлітом у співвідношенні приблизно 85 і 15 % відповідно (рис. 6, а–в). Розміри зерен коливаються в межах 8...10 балів за шкалою ДСТУ. Мікроструктура наплавленого зносостійкого шару являє собою дрібногочастий мартенсит (рис. 6, г).

Результати випробувань на ударну в'язкість наведено в табл. 3. Надрізи на зразках, вирізаних вздовж наплавлених шарів, розмічалися таким чином, щоб забезпечити удар у верхній і боковій площинах наплавлення.

З табл. 3 видно, що наплавлений метал характеризується високими показниками ударної в'язкості

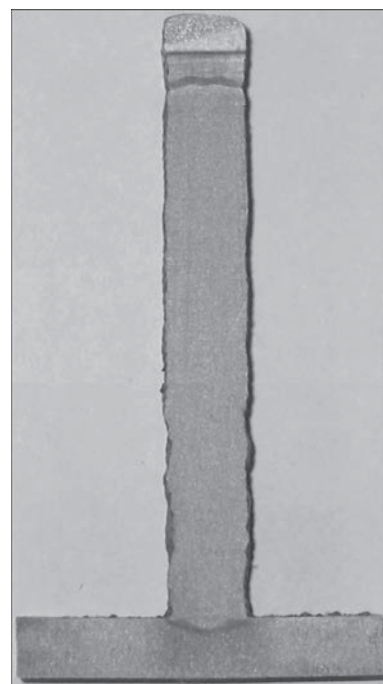


Рис. 5. Поперечний макрошліф наплавленого металу

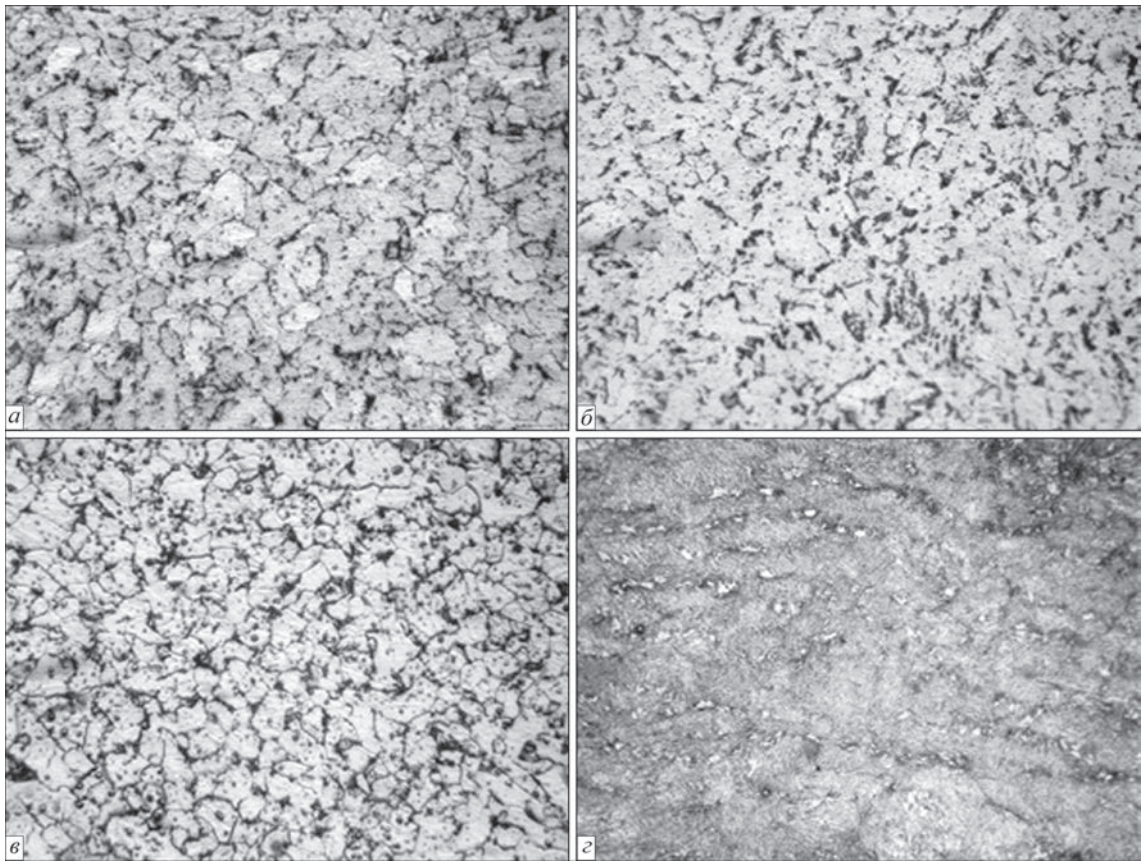


Рис. 6. Мікроструктура напавленого металу (×500): а – нижня частина напавленого металу; б – середня частина напавленого металу; в – верхня частина напавленого металу; г – зносостійке напавлення

за *KCU* і *KCV*. В обох випадках прослідковується наступна закономірність. Найнижчу ударну в’язкість мають зразки, вирізані вздовж шарів напавлення при ударі зверху. Зразки, вирізані вздовж шарів напавлення, при ударі збоку мають проміжні показники ударної в’язкості, які перевищують попередні. Найвищі показники ударної в’язкості мають зразки, вирізані впоперек шарів напавлення.

Випробування на розтяг проводились на зразках Ми 12 тип 1. Заготовки для зразків вирізались вздовж і впоперек шарів напавлення. Результати випробувань наведено в табл. 4. Вони свідчать, що, незалежно від напрямку вирізання заготовок, для зразків показники міцності та пластичності

дуже близькі за значенням. Порівняння цих показників з показниками міцності та пластичності сталі 09Г2С показують, що напавлений метал перевищує сталь 09Г2С [14]. Це при тому, що сталь 09Г2С пройшла термомеханічну обробку, а напавлений метал має литу структуру та не піддавався проковуванню чи прокатці.

Таким чином, результати механічних випробувань на ударну в’язкість і розтяг показали, що напавлений метал за показниками міцності, пластичності та ударної в’язкості перевищує аналогічні показники сталі 09Г2С, яка за хімічним складом найближча до напавленого металу.

Таблиця 3. Результати випробувань напавленого металу на ударну в’язкість

Температура випробувань	№ зразка	Напрямок удару	<i>KCU</i> , Дж/см ²	<i>KCV</i> , Дж/см ²
+20 °С	1	Вздовж напавлення, удар зверху	283,2	–
	2	Вздовж напавлення, удар збоку	306,0	–
	3	Впоперек напавлення	343,0	–
	4	Вздовж напавлення, удар зверху	–	212,9
	5	Вздовж напавлення, удар збоку	–	230,3
	6	Впоперек напавлення	–	245,1

Таблиця 4. Результати випробувань на розтяг

Температура випробувань	Номер зразка	Вирізка зразка	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
+20 °С	1	Вздовж напавлення	369,9	493,2	39,9	75,7
	2	Впоперек напавлення	378,8	494,6	27,2	75,0
	Сталь 09Г2С (довідкові дані) [14]		325,0	470,0	21,0	63,0

Таблиця 5. Твердість металу зносостійкого шару

Номер заміру твердості зносостійкого шару	Фактична твердість, HRC	Заявлена твердість, HRC
1	42	50...60
2	46	
3	52	
4	57	
5	44	

У табл. 5 наведено результати дослідження твердості наплавленого зносостійкого шару. Ці дані свідчать, що твердість зносостійкого шару в трьох замірах із п'яти виконаних не досягає заявлених паспортних показників і лише у двох замірах відповідає заявленому паспортному інтервалу твердості. Крім цього, різниця між максимальним і мінімальним показниками твердості досягає 15 HRC.

Нерівномірність у розподілі твердості можна пояснити процесом термоцикування, яке відбувається при наплавленні дугою періодичної дії [9, 10]. Термоцикування призводить до зменшення твердості та може впливати на рівномірність її розподілу. Однак практичних даних поки що мало, щоб робити впевнені висновки. Дослідження в даному напрямку продовжуються. Результати будуть опубліковані в наступних роботах.

Висновки

1. Встановлено, що антропоморфний робот Fanuc ARC Mate 100iC/7L забезпечує наплавлення дугою періодичної дії навіть без спеціалізованих джерел зварювального струму та механізму подачі дроту. Геометричні розміри отриманого зразка, створеного за допомогою наплавлення, відповідають спроектованій 3D моделі з допустимою похибкою ± 0,5 мм. Крім того, робот, оснащений системою машинного зору, забезпечує гарантоване виявлення поверхневих дефектів типу пор.

2. При багат шаровому наплавленні із застосуванням робототехнічного комплексу в металі формується дрібнозерниста (8...10 балів) структура, близька до монолітної, шари наплавлення майже не проглядаються.

3. Наплавлений метал має високі показники ударної в'язкості ($KCU \leq 343$ Дж/см², $KCV \leq 245$ Дж/см²) та пластичності ($\delta \leq 39,9$ %, $\psi \leq 75,7$ %) при достатньо високій міцності ($\sigma_b \leq 494,6$ МПа).

4. Заміри твердості на поверхні зносостійкого шару показали, що результати трьох з п'яти замірів не відповідають інтервалу твердості, зазначеному в паспортних даних виробника ESAB.

Список літератури

1. ASTM-International, ASTM Standard F2792-12 (2012) *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*.

2. Anuj V. Dongaonkar, Rajesh M. Metkar (2019) Reconstruction of damaged parts by integration reverse engineering (RE) and rapid prototyping (RP). In: *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 159–171. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-0305-0_14

3. 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>

4. Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M. et al. (2019) Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12, 1121. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12071121>

5. Гуляев А.П. (1966) *Металловедение*. Москва, Металлургия.

6. Патон Б.Е. (1974) *Технология электрической сварки плавлением*. Москва, Машиностроение.

7. Шоршоров М. Х. (1965) *Металловедение сварки стали и сплавов титана*. Москва, Наука.

8. Дудко Д.А., Савицкий А.М., Васильев В.Г., Новикова Д.П. (1996) Особенности структуры и свойств в сварных соединениях, формируемых с термоциклированием. *Автоматическая сварка*, 2, 6–7.

9. Дудко Д.А., Савицкий А.М., Савицкий М.М. и др. (1999) Восстановление острижков железнодорожных стрелочных переводов наплавкой со сложным термоциклом. *Автоматическая сварка*, 12, 46–49.

10. Дудко Д.А., Савицкий А.М., Савицкий М.М., Олейник Е.М. (1998) Особенности тепловых процессов при сварке с термоциклированием. *Автоматическая сварка*, 4, 8–12.

11. Вагнер Ф.А. (1980) *Оборудование и способы сварки пульсирующей дугой*. Москва, Энергия.

12. Вагнер Ф.А., Степанов В.В. (1968) Выбор параметров режима сварки пульсирующей дугой и их влияние на свойства сварных соединений. *Автоматическая сварка*, 5, 14–16.

13. Вагнер Ф.А. (1980) Термоциклирование при сварке вольфрамовым электродом. *Сварочное производство*, 2, 4–6.

14. Сорокин В.Г. (1989) *Марочник сталей и сплавов*. Москва, Машиностроение.

References

1. ASTM-International, ASTM Standard F2792-12 (2012) *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*.

2. Anuj V. Dongaonkar, Rajesh M. Metkar (2019) Reconstruction of damaged parts by integration reverse engineering (RE) and rapid prototyping (RP). In: *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 159–171. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-0305-0_14

3. 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>

4. 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>

5. Gulyaev, A.P. (1966) *Metal research*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

6. Paton, B.E. (1974) *Electric fusion welding technology*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

7. Shorshorov, M.Kh. (1965) *Metal science of welding steel and titanium alloys*. Moscow, Nauka [in Russian].

8. Dudko, D.A., Savitsky, A.M., Vasiliev, V.G., Novikova, D.P. (1996) Features of structure and properties in welded joints formed with thermal cycling. *Avtomatich. Svarka*, **2**, 6–7 [in Russian].
9. Dudko, D.A., Savitsky, A.M., Savitsky, M.M., Polikarpov, V.F., Savitsky, V.L. (1999) Restoration of railway switch points by surfacing with a complex thermal cycle. *Avtomatich. Svarka*, **12**, 46–49 [in Russian].
10. Dudko, D.A., Savitsky, A.M., Savitsky, M.M., Oleynik, E.M. (1998) Features of thermal processes during welding with thermal cycling. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 8–12 [in Russian].
11. Wagner, F.A. (1980) *Equipment and methods of pulsed arc welding*. Moscow, Energiya [in Russian].
12. Wagner, F.A., Stepanov, V.V. (1968) Selection of pulsed arc welding mode parameters and their influence on the properties of welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 14–16 [in Russian].
13. Wagner, F.A. (1980) Thermal cycling when welding with a tungsten electrode. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 4–6 [in Russian].
14. Sorokin, V.G. (1989) *Data base of steels and alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

ROBOTIC COMPLEX FOR MULTILAYER SURFACING BY PERIODIC ARC AND CONTROL OF SURFACE DEFECTS OF THE DEPOSITED METAL

E.V. Shapovalov, A.S. Novodranov, V.M. Vashchenko, O.M. Savytskyi, F.S. Klishchar

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: artur19940731@gmail.com

The paper considers the peculiarities of using a robotic complex based on the anthropomorphic robot Fanuc ARC Mate 100iC/7L for the implementation of multilayer surfacing with a periodic arc. It has been shown that although the inverter welding current source Fronius TPS 320i, according to its technical characteristics, cannot provide a periodic reduction in the arc thermal power to zero at a frequency of 0.2...0.5 Hz, the technological capabilities of the robot, with appropriate programming, are capable of providing a pulsed arc process in the specified frequency range. In addition, the robot, equipped with a machine vision system, allows testing for surface defects during the cooling of the next deposited metal layer. The macrosections and metallographic tests showed the high quality of the deposited metal formation. In the deposited metal, an almost monolithic fine-grained structure (8...10 grain numbers) with high impact strength and ductility at a sufficiently high strength is formed. The above indicates the expediency of using robotic systems for multilayer surfacing and the implementation of 3D technologies using arc welding in shielded gases. 14 Ref., 5 Tabl., 6 Fig.

Keywords: 3D technology, periodic arc, metal structure, machine vision system, robotic complex

Отримано 28.06.2024

Отримано у переглянутому вигляді 22.07.2024

Прийнято 13.09.2024

ДЕМОНСТРАЦІЯ В КНР ЗВАРЮВАННЯ ЖИВИХ ТКАНИН В ОТОЛАРИНГОЛОГІЇ

У липні 2024 р. завідувач кафедри дитячої оториноларингології, аудіології та фоніатрії НУОЗ України ім. П.Л. Шупика, професор Анатолій Косаківський та співробітник відділу «Зварювальні та споріднені технології в медицині та екології» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України Віктор Ткаченко відвідали лікарню № 2 міста Нінбо в КНР, де відбулися перемовини за участю провідних спеціалістів відділу отоларингології.

А. Косаківський та В. Ткаченко, поділилися досвідом використання технології зварювання живих біологічних тканин в отоларингології із демонстрацією відеоматеріалів, а також провели майстер-клас із використанням обладнання для електрозварювання на внутрішніх органах тварин *in vitro*. При цьому використовувались генератор ЕКВЗ-300, розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, та спеціалізовані інструменти, виготовлені за патентами А. Косаківського.

Були проведені хірургічні втручання *in vivo* на здорових дорослих собаках. А. Косаківський разом з В. Ткаченко виконали 9 операцій, зокрема тонзилектомії, електротермоадгезію піднебінних мигдаликів, фенолупластику, електротермоадгезію нижніх носових раковин, видалення пухлини орбіти з одночасним зварюванням країв рани. Ускладнень після хірургічних втручань не спостерігалось.



Китайські лікарі позитивно оцінили технологію електрозварювання живих біологічних тканин та якість проведених хірургічних втручань. Китайська сторона висловила готовність впроваджувати дану технологію в КНР та проведення спільних наукових досліджень.

Проведені експерименти демонструють, що технологія високочастотного зварювання тканин є безпечнішим і ефективнішим методом тонзилектомії порівняно з монополярною електрокоагуляцією. Техніка зварювання тканин призвела до зменшення інтраопераційної кровотечі, швидшого відновлення та скорочення тривалості операції. Отримані результати свідчать про те, що високочастотне зварювання тканин може мати широке застосування в клінічній хірургії, особливо для пацієнтів із ризиком кровотечі.

ВікторТкаченко