DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.05.043>
УДК 621.791.927.5+681.5.015

В.В. Долиненко, канд. техн. наук, **Є.В. Шаповалов**, канд. техн. наук,
В.А. Коляда, канд. техн. наук, **Т.Г. Скуба**
Ін-т електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
03680, ГСП, Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11
тел.: (044) 2004711, E-mail: eshapovalov@paton.kiev.ua

Синтез математичної моделі з нечіткою логікою для адаптивного управління процесом MIG/MAG наплавлення

Досліджено вплив вхідних параметрів на проплавлення основного металу і геометричні параметри валиків, наплавлених з використанням електродугового зварювання у захисному газі електродом, що плавиться (MIG/MAG). Наплавлення виконано робототехнічним комплексом з джерелом живлення дуги Fronius TPS-320i в режимі синергетичного управління дуговим процесом. Дуговий процес наплавлення реалізовано в середовищі суміші захисного газу ($\text{Ar}+18\%\text{CO}_2$) з використанням зварювального дроту Св-08Г2С діаметром 1 мм. Швидкість наплавлення — 4 мм/с, частота коливань пальника — 1 Гц. Отримані експериментальні залежності ширини і висоти валика дозволили синтезувати математичну модель з нечіткою логікою. Результати досліджень можуть бути використані для створення програми багатопрохідного адаптивного MIG/MAG наплавлення при роботизованому відновленні поверхонь деталей відповідального призначення, а також при підготовці кінцево-елементної моделі процесу MIG/MAG наплавлення в нижньому положенні.

К л ю ч о в і с л о в а: роботизоване MIG/MAG наплавлення, геометричні параметри валиків, математична модель процесу наплавлення, функціональний перетворювач з нечіткою логікою.

Створення адаптивної робототехнічної системи відновлення деталей складних просторових форм з використанням технології електродугового наплавлення має супроводжуватися проведенням теоретичних та прикладних досліджень. Метою прикладних досліджень є накопичення і формалізація знань в області технології наплавлення, а саме з'ясування, як формуються валики та шари наплавлення з використанням заданих зварювальних матеріалів в заданому просторовому положенні деталі і за обумовленого складу зварювального обладнання. Відомі результати таких досліджень [1—3] спрямовані здебільшого на вирішення техноло-

© Долиненко В.В., Шаповалов Є.В., Коляда В.А., Скуба Т.Г., 2021

гічних задач, ніж на розробку алгоритмів технологічної адаптації [4], які потрібні для реалізації адаптивної робототехнічної системи управління MIG/MAG наплавленням.

Було поставлено задачу дослідити, як впливає швидкість подачі дроту і амплітуда поперечних коливань пальника на проплавлення основного металу і геометричні параметри валиків, що наплавляються в нижньому положенні з використанням MIG/MAG зварювання. Наплавлення виконувалось робототехнічним комплексом: робот-маніпулятор типу FANUC, механізм подачі зварювального дроту Fronius WF-25iR-PAP і джерело живлення дуги Fronius TPS-320i [5]. Особливість даної конфігурації: джерело живлення дуги налаштовано на режим синергетичного управління дуговим процесом зварювання [6], коли передбачено зовнішнє управління технологічним процесом тільки через швидкість подачі дроту (регулювання додаткового параметра «довжина дуги» не виявилось ефективним).

В цьому режимі роботи джерело живлення дуги самостійно управляє поточними параметрами напруги зварювання і контролює частоту коротких замикань дугового проміжку. Для адекватної роботи синергетичного управління необхідно задати склад суміші захисного газу, вид металу, що зварюється, діаметр зварювального дроту і товщину металу деталі. Другим ступенем свободи регулятора для реалізації технологічної адаптації обрано амплітуду поперечних коливань пальника, які виконувались роботом FANUC ARC Mate 100-iC-7L (контролер R30iB) [7]. Форма коливань — «спіраль» (параметр «довжина витка спіралі» — 6 мм).

Досліджено формування окремих валиків та шарів наплавлення при різних коефіцієнтах перекриття. Дуговий процес наплавлення реалізовано в середовищі суміші захисного газу ($\text{Ar}+18\%\text{CO}_2$) з використанням зварювального дроту СВ-08Г2С діаметром 1 мм. Режим наплавлення: швидкість наплавлення — $v_{\text{зв}}=4$ мм/с, частота коливань пальника — $f_k=1$ Гц, відстань від наконечника пальника до поверхні деталі — $l_{\text{н.д}}=12$ мм. Наплавлення виконували без попереднього підігріву на пластини із малоуглецевої конструкційної сталі (аналог сталі 20) товщиною 20 мм. Перед наплавленням поверхня пластин була очищена від іржі і окалини за допомогою механічної обробки абразивним матеріалом.

Цілі досліджень були такі:

- 1) перевірка можливості використання зварювального джерела живлення Fronius TPS-320i для виконання наплавочних робіт;
- 2) напрацювання бази знань відносно режимів, параметрів наплавлених валиків і шарів металу при виконанні MIG/MAG наплавлення в середовищі суміші захисних газів ($\text{Ar}+18\%\text{CO}_2$) зварювальним дротом діаметром 1 мм (рис. 1);

Рис. 1. Схема процесу MIG/MAG наплавлення: 1 — джерело живлення дуги; 2 — механізм подачі зварювального дроту; 3 — наконечник зварювального пальника, що контактує зі зварювальним дротом; 4 — зварювальна дуга; 5 — наплавлений валик; 6 — деталь, що відновлюється; v_n — швидкість подачі зварювального дроту; $I_{зв}$ і $U_{зв}$ — струм і напруга зварювання; $l_{нд}$ — відстань від наконечника до поверхні деталі

Рис. 2. Сталева пластина з наплавленими валиками: 6, 7, 8, 9, 10, 11 — наплавлені без коливань пальника; 2, 5, 13, 16, 21 — наплавлені з коливаннями амплітудою 1 мм; 1, 4, 12, 14, 20 — наплавлені з коливаннями амплітудою 2 мм; 3, 14, 17, 19, 22 — наплавлені з коливаннями амплітудою 3 мм; 8 і 18 — наплавлені для налаштування програми управління робота

Рис. 3. Схема наплавленого валика: 1 — наплавлений метал; 2 — проплавлення; 3 — основний метал

Рис. 4. Макрошліфи наплавлених валиків

3) синтез математичної моделі процесу MIG/MAG наплавлення для забезпечення можливості реалізації технологічної адаптації.

Як деталь, що підлягає ремонту, використано заготовку трикутної форми з плоскою поверхнею. На рис. 2 відображено сталеву пластину товщиною 20 мм, на якій виконано наплавлення 22-х валиків в різних режимах зварювання і з різними амплітудами коливань пальника w_k . Серед отриманих результатів досліджень є і такі, що в подальшому не можна рекомендувати для використання. Ці результати сформулювали границю обмеження допустимих режимів MIG/MAG наплавлення.

Досліджувалось формування валиків у п'яти режимах зварювання:

- 1) $v_{\Pi} = 3$ м/хв: $I_{зв} = 85$ А, $U_{зв} = 17,7$ В (валики 6, 19, 20, 21);
- 2) $v_{\Pi} = 4,2$ м/хв: $I_{зв} = 116$ А, $U_{зв} = 18,5$ В (валики 9, 14, 15, 16);
- 3) $v_{\Pi} = 6$ м/хв: $I_{зв} = 147$ А, $U_{зв} = 19,7$ В (валики 1, 2, 10, 17);
- 4) $v_{\Pi} = 7,3$ м/хв: $I_{зв} = 180$ А і $U_{зв} = 20,7$ В (валики 3, 4, 5, 11);
- 5) $v_{\Pi} = 7,8$ м/хв: $I_{зв} = 188$ А і $U_{зв} = 21,5$ В (валики 7, 12, 13, 22).

Після виконання наплавлення пластина з валиками була розрізана так, щоб отримати середньостатистичні дані з трьох значень: висота валика h_v , ширина валика b і глибина проплавлення $h_{пр}$. Схематичне зображення наплавленого валика показано на рис. 3. Отримані макрошліфи наплавлених валиків наведено на рис. 4.

Як свідчить рис. 4, в залежності від режиму зварювання і амплітуди коливань пальника w_k ширина валиків може змінюватися в діапазоні від 5,0 мм до 13,0 мм, висота валиків — від 1,7 до 3,6 мм, а глибина проплавлення — від 0,5 до 2,5 мм.

В таблиці подано результати вимірювання геометричних параметрів макрошліфів валиків (середнє арифметичне із трьох вибірок). Можна бачити три граничні режими наплавлення, а саме:

- 1) $v_{\Pi} = 3$ м/хв, $w_k = 2,0$ мм;
- 2) $v_{\Pi} = 3$ м/хв, $w_k = 3,0$ мм;
- 3) $v_{\Pi} = 4,2$ м/хв, $w_k = 3,0$ мм.

Аналіз зовнішнього вигляду валиків і структури макрошліфів свідчить про те, що наплавлення в цих режимах супроводжується дефектами — підрізами, непроварами і порами. Ці режими не можна рекомендувати для використання на практиці, вони окреслили межу допустимих режимів MIG/MAG наплавлення (див. таблицю). Інші режими наплавлення при $w_k > 1$ мм (крім режиму $v_{\Pi} = 7,8$ м/хв, $w_k = 2,0$ мм) супроводжуються грибоподібною формою проплавлення. Моделювання таких режимів наплавлення в середовищі кінцево-елементної моделі може потребувати суттєвих змін структури математичної моделі джерела теплової дії зварювальної дуги.

Отримані результати, подані у графічному вигляді, дають чітке розуміння залежності ширини, висоти валика і глибини проплавлення від режиму наплавлення і амплітуди коливань пальника (рис. 5). На рис. 5, а,

v_{Π} , м/хв	Ширина і висота наплавлених валиків та глибина проплавлення (мм) при w_k , мм			
	0	1,0	2,0	3,0
<i>Ширина валиків b</i>				
3,0	5,0 (6)	5,8 (21)	7,0 (20)**	8,0 (19)**
4,2	6,0 (9)	7,0 (16)	8,5 (15)*	9,0 (14)**
6,0	8,0 (10)	9,0 (2)	10,0 (1)*	11,0 (17)*
7,3	9,0 (11)	9,8 (5)	10,8 (4)*	11,8 (3)*
7,8	10,0 (7)	11,0 (13)	12,0 (12)	13,0 (22)*
<i>Висота валиків h_b</i>				
3,0	2,5 (6)	2,3 (21)	2,0 (20)**	1,7 (19)**
4,2	3,0 (9)	2,9 (16)	2,8 (15)*	2,6 (14)**
6,0	3,3 (10)	3,0 (2)	2,9 (1)*	2,7 (17)*
7,3	3,4 (11)	3,2 (5)	3,1 (4)*	2,9 (3)*
7,8	3,6 (7)	3,5 (13)	3,3 (12)	3,0 (22)*
<i>Глибина проплавлення $h_{\Pi P}$</i>				
3,0	1,0 (6)	0,8 (21)	0,45 (20)**	0,25 (19)**
4,2	1,5 (9)	1,0 (16)	0,6 (15)*	0,4 (14)**
6,0	1,9 (10)	1,5 (2)	0,95 (1)*	0,7 (17)*
7,3	2,4 (11)	1,75 (5)	1,25 (4)*	0,95 (3)*
7,8	2,5 (7)	1,9 (13)	1,4 (12)	1,1 (22)*

Примітки: * — режими, що супроводжуються дефектами; ** — режими, що супроводжуються грибоподібною формою проплавлення. В дужках вказано номер валика.

Рис. 5. Залежність ширини (а) висоти (б) і глибини проплавлення (в) валика від швидкості подачі дроту та амплітуди коливань пальника: $\diamond$ — $v_n = 3,0$ м/хв; $\blacksquare$ — $v_n = 4,2$ м/хв; $\blacktriangle$ — $v_n = 6,0$ м/хв; $\times$ — $v_n = 7,3$ м/хв; $\ast$ — $v_n = 7,8$ м/хв

видно, що залежність ширини валика від швидкості подачі дроту і амплітуди коливань пальника має прямо пропорційний характер. Рис. 5, б, свідчить про лінійний характер апроксимації результатів досліджень висоти валика h_b . На рис. 5, б, видно, що залежність висоти валика від швидкості подачі дроту і амплітуди коливань пальника має обернено пропорційний характер, а також суттєву нелінійність по швидкості подачі у діапазоні $v_n = 3,0 \dots 4,2$ м/хв. Наявність нелінійності можна пояснити наявністю дефектів в формуванні валика.

Графіки лінійної апроксимації результатів досліджень глибини проплавлення $h_{пр}$ на рис. 5, в, свідчать про те, що залежність глибини проплавлення від швидкості подачі дроту і амплітуди коливань пальника має обернено пропорційний характер і незначну нелінійність, яку можна пояснити наявністю грибоподібного проплавлення.

На рис. 6 наведено графік апроксимації результатів досліджень довжини зварювальної ванни $l_{зв}$ від швидкості подачі дроту при $v_n = 0$. Довжина ванни оцінювалась по формі застиглої поверхні після закінчення зварювання з миттєвим зняттям напруги без відпрацювання технологічної операції «заварка кратера». Отримані значення довжини зварювальної ванни можуть бути використані при виконанні кінцево-елементного моделювання та дозволяють оцінити адекватність налаштувань параметрів термомеханічної моделі процесу наплавлення.

Результати досліджень доцільно подавати в компактній формі функціонального перетворювача. Це дозволяє оцінювати параметри валиків, що наплаваються, при довільних значеннях параметрів режиму зварювання. Аналіз отриманих залежностей для висоти h_b і ширини валика b свідчить, що раціональним рішенням є створення непарамет-

Рис. 6. Графік залежності довжини зварювальної ванни від швидкості подачі дроту при $w_k = 0$

ричного функціонального перетворювача. В роботах [8, 9] описано підхід до розробки непараметричних функціональних перетворювачів з використанням

теорії нечітких множин. Згідно з теоремою В. Kosko [10] використання нечітких множин дозволяє виконати апроксимацію будь-якої математичної залежності на основі моделі нечіткого логічного висновку. За цієї теорії існують операції з небінарними стосунками входження, які дозволяють визначити міру приналежності елемента x деякої безлічі X нечіткій множині A в безперервному діапазоні $[0, 1]$ з використанням симетричних або несиметричних трикутних функцій приналежності $\mu_A(x)$ або функцій інших видів.

Для синтезу функціонального перетворювача з нечіткою логікою застосовано несиметричні трикутні функції приналежності:

$$\mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c, \\ 0, & x \geq c, \end{cases}$$

де a, b, c — деякі числові параметри, що набувають довільних дійсних значень і впорядковані відношенням $a < b < c$.

Кількість і параметри нечітких термів будемо узгоджувати із множиною отриманих значень вхідних і вихідних параметрів. Вузол приведення до нечіткості для параметра w_k має чотири функції приналежності (див. таблицю), а аналогічний вузол для параметра v_p — п'ять функцій приналежності.

На рис. 7, а, наведено синтезовану структурну схему функціонального перетворювача з нечіткою логікою, який складається із двох вузлів, FIS₁ і FIS₂, з нечіткою логікою, двох вхідних каналів введення нечіткості для параметрів v_p і w_k , і двох вихідних каналів приведення до чіткості значень змінних h_b і b . Вузол h_b має п'ятнадцять функцій приналежності, а вузол b — чотирнадцять (див. таблицю). Слід зазначити, що використовуються як симетричні, так і несиметричні трикутні функції приналеж-

Рис. 7. Структурна схема функціонального перетворювача з нечіткою логікою (а) та функції приналежності його виходів (б)

ності. На рис. 7, б, наведено графічні зображення функцій приналежності виходів.

Функціонування вузлів FIS₁ і FIS₂ відповідає алгоритму типу «mat-dani», де нечіткі продукційні правила мають вигляд

ЯКЩО $x_1 \in A_1$ і ЯКЩО $x_2 \in A_2$ і ... і ЯКЩО $x_n \in A_n$, ТО $z \in C$.

Тут $A = A_1 \cap A_2 \dots \cap A_n$. Множини продукційних правил формують базу знань функціонального перетворювача з нечіткою логікою.

Засобами математичного пакету MATLAB Fuzzy Logic Toolbox було синтезовано функціональний перетворювач з нечіткою логікою і базою знань, що включає сорок продукційних правил. База знань складається із

Рис. 8. Поверхні виходів функціонального перетворювача з нечіткою логікою

двадцять продукційних правил для виходу b і такої ж кількості продукційних правил для виходу h_B .

На рис. 8 показано зображення поверхонь виходів синтезованого функціонального перетворювача з нечіткою логікою. Незважаючи на те що поверхні виходів є достатньо рельєфні, вони в першому наближенні вірно відображають фізичну природу зв'язків між параметрами процесу зварювання для даного діапазону їх варіювання, що зафіксовано при виконанні експериментів із наплавленням валиків.

Роботу синтезованого в пакеті Fuzzy Logic Toolbox об'єкта можна перевірити в середовищі MATLAB Simulink, а потім сформулювати потрібні для подальшої роботи текстові файли кодів мовою C++. Для цього потрібно визвати наступну послідовність меню: «C/C++ Code→Embedded Coder Quick Start→Build This System». Створений проєкт C++ має у своєму складі всі потрібні файли для реалізації функціонального перетворювача з нечіткою логікою. Так, для Simulink-об'єкта Fuzzy1 буде сформовано проєкт з такими файлами: Fuzzy1.c, Fuzzy1_data.c, Fuzzy1.h, Fuzzy1_types.h та ін. На основі цих текстових файлів проєкту C++ може бути створено програмне забезпечення підсистеми технологічної адаптації системи роботизованого наплавлення, яка призначена для відновлення поверхонь деталей складних просторових форм.

Висновки

Синтезований функціональний перетворювач з нечіткою логікою, який дозволяє отримувати оцінки висоти і ширини валика, що наплавляється, при довільних значеннях вхідних параметрів дає змогу реалізувати адап-

тивне управління процесом MIG/MAG наплавлення (без втручання оператора-зварювальника), що суттєво розширює спектр вирішуваних задач зварювальним робототехнічним комплексом. Виконані дослідження процесу наплавлення валиків і шарів металу з використанням зварювального дроту Св-08Г2С діаметром 1 мм в середовищі суміші захисного газу ($\text{Ar}+18\%\text{CO}_2$) також дозволили отримати необхідну інформацію для виконання адекватного кінцево-елементного моделювання процесу MIG/MAG наплавлення в нижньому положенні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Рябцев И.А., Переплетчиков Е.Ф., Бартечев И.А. Влияние амплитуды и частоты колебаний плазматрона на химическую и структурную неоднородность металла, наплавленного плазменно-порошковым методом // Автомат. сварка, 2018, № 5, с. 3—8.
2. Бабінець А.А., Рябцев І.О., Лентюгов І.П. Вплив амплітуди і частоти коливань електродного дроту при дуговому наплавленню на формування і структуру наплавленого металу і проплавлення основного металу // Там же, 2020, № 10, с. 26—33.
3. Рябцев И.А., Бабінець А.А., Лентюгов І.П., Турык Э.В. Влияние скорости подачи электродной проволоки на проплавление основного металла при дуговой наплавке // Там же, 2019, № 3, с. 23—29.
4. Долиненко В.В., Коляда В.А., Шаповалов Е.В., Скуба Т.Г. Алгоритм технологической адаптации для автоматизированной многопроходной МИГ/МАГ сварки изделий с переменной шириной разделки кромок // Там же, 2013, № 1, с. 16—22.
5. Fronius TPS-320i. — Режим доступа: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/migmag/tpsi/tpsi/tps-320i> (назва з екрана).
6. Синергетическое управление сваркой и его преимущества. — Режим доступа: <https://patonweld.com.ua/41-cto-takoe-sinergeticheskoe-upravlenie-dlya-mig-mag-svarki-i-kakie-ego-preimushchestva> (назва з екрана).
7. Intelligent Arc Welding Robot. FANUC ARC Mate 100-iC. — Режим доступа: [https://www.fanuc.com/fvl/vn/product/catalog/ARCMateiC\(E\)-06.pdf](https://www.fanuc.com/fvl/vn/product/catalog/ARCMateiC(E)-06.pdf) (назва з екрана).
8. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. С-Пб: БХВ — Петербург, 2005, 716 с.
9. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009, 798 с.
10. Kosko B. Fuzzy Systems as Universal Approximators // IEEE Trans. on Computers, 1994, vol. 43, № 11, pp. 1329—1333.

Отримано 12.07.21

REFERENCES

1. Ryabtsev I.A., Perepletchikov E.F., Bartenev I.A. (2018), "Influence of the amplitude and frequency of oscillations of the plasmatron on the chemical and structural inhomogeneity of the metal deposited by the plasma-powder method", *Automatic Welding*, no. 5, pp. 3-8.
2. Babinets A.A., Ryabtsev I.O., Lentyugov I.P. (2020), "Injection of the amplitude and frequency of the electrode dart during arc deposition onto the molding and structure of the deposited metal and the penetration of the base metal", *Automatic Welding*, no. 10, pp. 26-33.

3. Ryabtsev I.A., Babinets A.A., Lentugov I.P., Turyk E.V. (2019), "Influence of the electrode wire feed rate on the penetration of the base metal during arc surfacing", *Automatic Welding*, no. 3, pp. 23-29.
4. Dolinenko V.V., Kolyada V.A., Shapovalov E.V., Skuba T.G. (2013), "Algorithm of technological adaptation for automated multi-pass MIG/MAG welding of products with variable groove widths", *Automatic Welding*, no. 1, pp. 16-22.
5. "Fronius TPS-320i", available at: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/migmag/tpsi/tpsi-320i> (accessed June 18, 2021).
6. "Synergetic control of welding and its advantages", available at: <https://patonweld.com.ua/41-chto-takoe-sinergeticheskoe-upravlenie-dlya-mig-mag-svarki-i-kakie-ego-preimushchestva> (accessed June 18, 2021).
7. "Intelligent Arc Welding Robot. FANUC ARC Mate 100-iC", available at: [https://www.fanuc.com/fvl/vn/product/catalog/ARCMateiC\(E\)-06.pdf](https://www.fanuc.com/fvl/vn/product/catalog/ARCMateiC(E)-06.pdf) (accessed June 18, 2021).
8. Leonenkov A. (2005), *Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH*, St. Petersburg, BHV.
9. Pegat A. (2009), *Fuzzy modeling and control*, Moscow, BINOM, Knowledge Laboratory.
10. Kosko B. (1994), "Fuzzy Systems as Universal Approximators", *IEEE Trans. on Computers*, Vol. 43, no. 11, pp. 1329-1333.

Received 12.07.21

*V.V. Dolinenko, E.V. Shapovalov, V.A. Kolyada and T.G. Skuba*SYNTHESIS OF FUZZY LOGIC MATHEMATICAL MODEL
FOR ADAPTIVE CONTROL OF THE MIG/MAG SURFACING

A functional transformer with fuzzy logic is synthesized, which allows to get the estimations of weld beads height and width at the arbitrary values of entry parameters: wire feed speed and torch transverse oscillations amplitude. The influence of these input parameters on the base metal penetration and beads geometric parameters, welded using MIG/MAG process, were studied. Surfacing was performed by a robotic system with an arc power supply "Fronius TPS-320i", which operated in the mode of arc process synergetic control. The formation of both individual beads and surfacing layers at different overlap coefficients has been studied. The arc surfacing process was realized in a mixture of protective gases (Ar+18%CO₂) using a welding wire Св-08Г2С with a 1.0 mm diameter. Surfacing speed – 4 mm/s, frequency of welding torch oscillations – 1 Hz. The obtained experimental dependences of beads width and height, as well as the length of the welding pool can be used in both: creating of multi-pass MIG/MAG surfacing program for robotic restoration of critical purposes parts surfaces, and in preparing of FEM model of MIG/MAG surfacing.

Keywords: robotic MIG/MAG surfacing, geometrical parameters of beads, mathematical model of surfacing process, functional transformer with fuzzy logic.

ДОЛИНЕНКО Володимир Володимирович, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ. В 1979 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — проектування автоматизованих систем управління зварюванням та наплавленням, чисельне моделювання термомеханічної та гідромеханічної задач, автоматичне управління дуговим зварюванням.

ШАПОВАЛОВ Євген Вікторович, канд. техн. наук Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ. В 1999 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — створення перспективних зразків лазерно-триангуляційних відеосенсорів, робототехнічні системи для дугової зварювання, неруйнівний контроль якості зварювальних швів.

КОЛЯДА Володимир Олександрович, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ. В 2002 г. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — створення імітаційних моделей відеосенсорів, розробка математичного забезпечення для відеосенсорів, розв'язок прямої та зворотної задач кінематики маніпуляторів.

СКУБА Тарас Григорович, наук. співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ. В 2002 г. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — імітаційне моделювання роботизованих комплексів, розробка математичного забезпечення для систем управління роботами, адаптивне управління дуговим зварюванням і наплавленням.