

PACS numbers: 06.60.Vz, 61.72.Ff, 61.72.Qq, 62.20.Qp, 81.05.Rm, 81.15.Lm, 81.20.Vj

**Вплив типу та гранулометричного складу компонентів осердя
металопорошкових електродних дротів на структуру
та властивості багат шарового нагрітого металу системи
легування C–Cr–Mo–W–V**

А. А. Бабінець*, С. Л. Шваб*, М. М. Ворон**

**Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна*

***Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 34/1,
03142 Київ, Україна*

Експериментально досліджено вплив типу та гранулометричного складу металевих компонентів осердя металопорошкових дротів на їхні характеристики топлення, а також якість формування, властивості та структуру покриттів, одержаних методом електродугового нагрітання. В якості шихтових компонентів осердя дослідних дротів використовували гранульований порошок марки ПГ-Р6М5 фракцією у 50...300 мкм і 200...250 мкм. В якості еталону використовували порошковий дріт, осердя якого складалось із компонентів у вигляді порошків феростопів, вміст яких був розрахований так, щоб одержати хемічний склад, аналогічний до дослідних дротів. Електродугове нагрітання виконували на стандартному обла-

Corresponding author: Anatoliy Anatoliyovych Babinets
E-mail: a_babinets@ukr.net

**E.O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazymyr Malevych St., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

***Physical and Technological Institute of Metals and Alloys, N.A.S. of Ukraine,
34/1 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: A. A. Babinets, S. L. Schwab, and M. M. Voron, The Influence of the Type and Granulometric Composition of the Core Components of Metal Powder Electrode Wires on the Structure and Properties of the Multilayer Deposited Metal of the C–Cr–Mo–W–V Alloying System, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 47, No. 5: 535–554 (2025). DOI: [10.15407/mfint.47.05.0535](https://doi.org/10.15407/mfint.47.05.0535)

© Publisher PH “Akadempriodyka” of the NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0>)

днанні під флюсом АН-26П з дотриманням однакових режимів для коректності порівняння. Оцінку якості топлення порошкових дротів визначали за допомогою розробленої методики на основі визначених коефіцієнтів розтоплення, натоплення та втрат. Стабільність процесу натоплення визначали за дисперсією поточних значень величин струму та напруги на дузі за розрахованими коефіцієнтами варіації. Параметри режиму фіксували за допомогою цифрового записувального мультиметра, оснащеного високошвидкісним аналого-цифровим перетворювачем. Підготовку зразків і дослідження мікроструктури натопленого металу виконували за стандартними методиками металографічних досліджень. Експериментально визначено, що використання в якості компонентів осердя дослідних дротів гранульованого порошку майже однакового, збільшеного розміру (200...250 мкм) приводить до погіршення стабільності процесу електродугового натоплення і, як наслідок, підвищення неоднорідності структури натопленого металу та збільшення кількості мікрodefektів у ньому. Найбільша стабільність процесу натоплення металопорошковим дротом досягається з використанням у його осерді гранульованого порошку фракцією у 50...300 мкм. Завдяки однаковому хемічному складу та фізичним властивостям частинок гранульованого порошку, а також їхній меншій забрудненості шкідливими домішками у порівнянні із частинками феростопів і більш щільній упаковці в осерді порошкового дроту (у порівнянні із аналогічним порошком грануляцією у 200...250 мкм) досягається підвищення однорідності структури натопленого металу та зменшення кількості мікрodefektів у ньому.

Ключові слова: дугове натоплення, натоплений метал, гранульований стоп, феростоп, твердостопні порошки, структура металу, мікротвердість, включення.

The effect of the type and granulometric composition of the metal components of the core of metal powder wires on their melting characteristics, as well as the quality of formation, properties and structure of coatings obtained by the method of electric-arc welding, is experimentally investigated. Granulated powder of the PG-R6M5 brand with a fraction of 50...300 μm and 200...250 μm is used as the charge components of the core of the experimental wires. As a standard, a powder wire is used, the core of which consists of components in the form of ferroalloy powders, the content of which is calculated to obtain a similar chemical composition to the experimental wires. Electric-arc surfacing is performed on standard equipment under AN-26P flux, observing the same regimes for the correctness of the comparison. Evaluation of the quality of melting of flux-cored wires is determined using the developed methodology based on the determined coefficients of melting, surfacing and losses. The stability of the surfacing process is determined by the dispersion of the instantaneous estimates of the current and voltage values on the arc according to the calculated coefficients of variation. Mode parameters are recorded using a digital recording multimeter equipped with a high-speed analog-to-digital converter. Preparation of samples and investigation of the microstructure of the deposited metal are carried out according to standard methods of metallographic research. As determined experimentally, the use of granulated powder of almost the same, increased size

(200...250 μm) as core components of test wires leads to a deterioration in the stability of the electric-arc welding process and, as a result, to an increase in the heterogeneity of the structure of the deposited metal and to an increase in the number of microdefects in it. The greatest stability of the process of surfacing with metal powder wire is achieved, when granulated powder with a fraction of 50...300 μm is used in its core. Due to the same chemical composition and physical properties of the particles of the granulated powder, as well as their lower contamination with harmful impurities compared to the particles of ferroalloys and denser packing in the core of the powder wire compared to a similar powder with a granulation of 200...250 μm , an increase in the uniformity of the structure of the deposited metal and reducing the number of microdefects in it are achieved.

Key words: arc surfacing, deposited metal, granular alloy, ferroalloy, hard-alloy powder, metal structure, microhardness, inclusions.

(Отримано 14 квітня 2024 р.; остаточн. варіант — 8 жовтня 2024 р.)

1. ВСТУП

Процеси нагрівання широко використовуються як для зміцнення нових деталей машин і механізмів, так і для відновлення геометричних розмірів зношених поверхонь деталей після тривалої експлуатації їх. Для цього з використанням різних джерел теплової енергії (електричної або плазмової дуги, лазерного або електронного променя тощо), на поверхню деталі по чергові наносять шари розтопленого металу, ідентичного до його хімічного складу або більш легированого, якщо необхідно підвищити експлуатаційні властивості, такі як зносо- та термостійкість, втомна довговічність тощо [1–3].

Властивості покриттів, одержаних в такий спосіб, в першу чергу визначаються хімічним складом і структурою металу. Одними з основних шляхів поліпшення їх наразі є застосування різних хімічних або технологічних методів впливу, прикладами яких є підвищене легування або, навпаки, застосування мікролегувальних добавок різних хімічних елементів, використання зовнішніх технологічних імпульсних, магнетних, вібраційних й інших впливів на метал в процесі його кристалізації тощо [4–9].

Широкі можливості по управлінню хімічним складом, структурою та властивостями нагрітого металу дає використання металопорошкових дротів, які в найпростішому уявленні є трубкою, виготовленою з металевої стрічки, в осерді якої знаходиться порошкова композиція. Порошкові дроти знайшли найширше застосування для нагрівання та зварювання криць і стопів різного типу та призначення: низьколегированих конструкційних і легированих інструментальних криць, спеціальних стопів на основі заліза, тита-

ну, ніклю, кобальту та ін. [1, 4–7].

Разом з тим, в якості осердя порошкових дротів, призначених для натоплення та зварювання криць і стопів на основі заліза, в основному, застосовуються феростопи — стопи заліза з Si, Mn, Cr та ін. елементами, які використовуються для легування та поліпшення властивостей рідкого металу під час витопки криці. Основним недоліком цих матеріалів є їхня відносно висока забрудненість неметалевими включеннями, такими як сірка, фосфор тощо [10]. Ці включення є шкідливими, адже можуть негативно впливати на структуру та властивості готових виробів, переходячи із вихідних матеріалів у шари натопленого металу, проявляючи тим самим негативну хемічну та структурну спадковість [11].

Відомі приклади успішного використання в якості матеріялу осердя металопорошкових дротів ґранульованих порошків різних металів і стопів, одержаних методами розпорошення металевого розтопу [9, 12–14]. Основною перевагою таких матеріалів є їхня більш висока чистота від неметалевих включень й одержання натопленого металу практично будь-якого хемічного складу в порівнянні з традиційним порошковим дротом, склад якого обмежується вихідним вмістом кожного легувального елемента у відповідному феростопі від 45 до 75%.

Є й суперечливі дані про вплив ґранулометричного складу осердя порошкових дротів на структуру натопленого ними металу: іншими словами — про структурну спадковість між вихідними матеріялами та натопленим металом. За даними [15] використання порошкових матеріалів з частинками певного розміру (200...250 мкм) може істотно впливати на зварювально-технологічні властивості порошкових дротів, стабільність процесу натоплення і, як наслідок, на структуру та властивості натопленого металу.

Метою даної роботи є порівняльне експериментальне дослідження впливу типу та ґранулометричного складу металевих компонентів осердя металопорошкових дротів на якість формування, структуру та властивості багатошарових покриттів, одержаних методом електродугового натоплення.

2. МЕТОДИ ТА МАТЕРІЯЛИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідні зразки одержували методом електродугового натоплення топкими електродними порошковими дротами під шаром флюсу АН-26П, який призначений для захисту рідкої ванни та застиглого натопленого металу від атмосферного повітря. Всі зразки натоплювались у п'ять шарів, враховуючи високий коефіцієнт перемішування, характерний для дугових методів натоплення, щоб одержати розрахунковий хемічний склад металу в 3–4-му натопленому шарі.

Натоплення виконували на стандартному обладнанні: універсальній установці для натоплення У-653 із джерелом живлення ВДУ-506. Для одержання коректних результатів досліджень режими натоплення кожного шару для всіх зразків були однаковими: струм — 200 А, напруга — 30 В, швидкість натоплення — 18 м/год. Перед натопленням підігрівали зразки до температури у 300°C для уникнення гарячих тріщин у натопленому металі. В якості основного металу, на який виконували натоплення, використовували пластилини з криці Ст. 3 товщиною у 15 мм.

Дослідні металопорошкові дроти мали трубчасту конструкцію. Оболонку виготовлено з металевої стрічки з криці 08кп товщиною у 0,4 мм і шириною у 12 мм. Діаметер всіх дротів — 2,0 мм, коефіцієнт заповнення — 30%. Виготовлення порошкових дротів здійснювалося на потоковій лінії, яка включає волочильний стан і формувальний пристрій. Крицева стрічка проходить через профілювальні ролики, послідовно формуючись й одержуючи потрібний профіль заготовки. На певній стадії формування у стрічку засипається дозована кількість шихти. Сформована та заповнена шихтою заготовка дроту надходить на волочильний стан, де протягується маршпрутом до необхідного діаметра [16].

В якості шихтових компонентів осердя в дроті №1 використовували гранульований порошок марки ПГ-Р6М5 з розміром частинок у 50...300 мкм. Такий діапазон розміру для шихтових компонентів є стандартним під час виготовлення порошкових дротів згідно з рекомендаціями [16].

В осерді дроту №2 використовували порошок тієї ж марки, але гранулометричний склад був обмежений — 200...250 мкм. Як вказувалося вище, згідно з даними роботи [15], за таких розмірів частинок шихтових матеріалів в осерді самозахисного порошкового дроту забезпечується ліпше засвоєння Карбону та підвищується стабільність горіння дуги під час електродугового натоплення.

В осерді дроту №3 використовували порошки феростопів та інших металів, вміст яких був розрахований так, щоб одержати метал хемічного складу, аналогічного до дротів №№1 і 2. Гранулометричний склад порошків — 50...300 мкм. Цей порошковий дріт використовувався в якості еталону. Хемічний склад шихтових матеріалів, які використовувались у дослідженнях, наведено у табл. 1.

Оцінку стабільності процесу натоплення та якості формування натопленого металу виконували візуально й кількісно. Кількісну оцінку виконували, аналізуючи розраховані характеристики топлення порошкових дротів — коефіцієнти розтоплення (α_r), натоплення (α_n) та втрат (ψ) і дисперсію поточних значень величин струму та напруги на дузі за розрахованими коефіцієнтами варіації (k_i , k_u). Коефіцієнти варіації по струму та напрузі визначали як частку величини середньоквадратичного відхилення до середнього значення

ТАБЛИЦЯ 1. Хемічний склад матеріалів, які використовувалися для виготовлення дослідних порошкових дрітків.**TABLE 1.** Chemical composition of the materials used for the fabrication of experimental powder-coated wires.

Марка матеріалу	Хемічний склад, %										
	Fe	C	Cr	W	Mo	V	Si	Mn	Ni	S	P
ПГ-Р6М5	Осн.	1,0	4,0	6,5	5,0	1,9	0,5	0,5	2,0	0,03	0,03
Ферохром	Осн.	8,0	65,0	—	—	—	2,0	—	—	0,08	0,05
Феромолібден	Осн.	0,05	—	0,3	60,0	—	0,8	—	—	0,10	0,06
Ферованадій	Осн.	0,6	—	—	—	60,0	2,0	5,0	—	0,03	0,07
Феросиліцій	Осн.	0,1	0,3	—	—	—	75,0	0,4	—	0,02	0,04
Фероманган	Осн.	7,0	—	—	—	—	6,0	80,0	—	0,03	0,10
Графіт	1,60	98,0	—	—	—	—	—	—	—	0,05	—
Реліт	0,15	≤ 4,0	—	96,0	—	—	—	—	—	—	—
Ніклевий порошок	0,10	0,02	—	—	—	—	0,03	—	99,5	0,008	—
Залізний порошок	99,5	0,02	—	—	—	—	0,05	0,2	—	0,015	0,015
Стрічка 08кп	98,0	0,07	0,1	—	—	—	0,03	0,3	0,3	0,04	0,035

відповідного параметра. Розрахунок коефіцієнтів розтоплення (α_r), натоплення (α_n) та втрат (ψ) визначали, використовуючи широковідомі вирази:

$$\alpha_r = G_r / (It), \quad (1)$$

$$\alpha_n = G_n / (It), \quad (2)$$

$$\psi = ((\alpha_r - \alpha_n) / \alpha_r) \cdot 100\%, \quad (3)$$

де G_r — маса розтопленого металу [г], G_n — маса натопленого металу [г], I — зварювальний струм [А], t — час натоплення [год.].

Параметри режиму (величину струму та напруги на дузі) фіксували за допомогою цифрового записувального мультиметра ANENG AN9002, оснащеного високошвидкісним аналого-цифровим перетворювачем.

Визначення хемічного складу, що здійснювали рентгеноспектральним методом, і твердості металу за Роквеллом по шкалі *HRC* виконували в п'ятому натопленому шарі кожного зразка згідно зі стандартними методиками. Визначення мікротвердості натопленого металу виконували на мікротвердомірі ПМТ-3 під навантаженням у 100 г. Заміри мікротвердості виконували, починаючи з основного металу, відступивши від лінії стоплення на 0,25 мм і далі з кроком

у 0,5 мм по вертикальній осі нагрітих шарів.

Підготовку зразків для дослідження структури нагрітого металу виконували за стандартними методиками, які включають поетапне шліфування поверхні зразків з використанням алмазних паст різної дисперсності та наступне електролітичне щавлення в 20%-розчині хромової кислоти. Вивчення структури металу виконували на оптичному мікроскопі Neophot-2.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Візуально встановлено, що метал, нагрітий дослідними дротами №№1 і 2 має достатньо високу якість формування і в ньому відсутні як зовнішні (рис. 1, *a*), так і внутрішні (рис. 1, *b*) макродефекти. Дещо гіршу якість формування відмічено для металу, нагрітого дротом №3; макродефекти в ньому також відсутні. Якість відділення шлакової кірки з поверхні нагрітого металу є задовільною для всіх зразків.

Результати рентгеноспектральної аналізи та вимірювання твердості металу, нагрітого дротами трьох типів, показали (табл. 2), що метал всіх типів має практично однаковий хемічний склад і твердість. За цими показниками нагрітий метал відповідає низьколегованій інструментальній криці 30B2ХМФ.

Потрібно відзначити меншу забрудненість металу, нагрітого дротами з осердям із гранульованим стопом (№№1, 2), у порівнянні з дротом-еталоном, осердя якого складається з феростопів (№3), такими шкідливими домішками як Сульфур і Фосфор. Це має позитивно вплинути на структуру та властивості нагрітого металу. Крім того, діапазон показників твердості для металу, нагрітого порошковим дротом №3, найбільш широкий, що може свідчити про

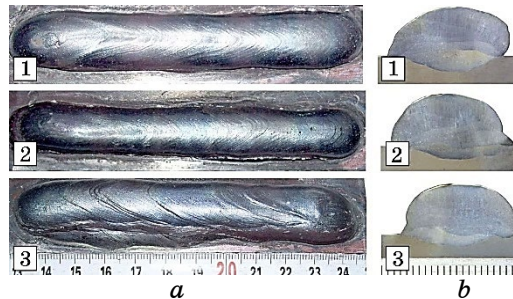


Рис. 1. Зовнішній вигляд поверхні зразків, нагрітих у п'ять шарів дротами №№ 1–3 (*a*), та їхні поперечні макрошліфи (*b*).

Fig. 1. Appearance of the surface of the samples deposited in five layers with wires Nos. 1–3 (*a*); their cross-sections (*b*).

ТАБЛИЦЯ 2. Хімічний склад і твердість металу, натопленого дослідними дротами.**TABLE 2.** Chemical composition and hardness of the metal deposited by experimental wires.

№	Вміст хімічних елементів у натопленому металі, % ваг.										Твердість, HRC
	Fe	C	Cr	Mo	W	V	Mn	Si	S	P	
1		0,19	1,2	1,64	1,70	0,50	0,3	0,56	0,020	0,022	30...32
2		0,19	1,2	1,71	1,74	0,51	0,3	0,56	0,021	0,024	29...31
3	Осн.	0,25	1,38	1,27	1,63	0,35	0,38	0,73	0,027	0,037	28...32
*		0,2– 0,3	1,0– 1,4	1,0– 1,7	1,5– 2,0	0,3– 0,5	0,3– 0,5	0,3– 0,5	$\leq 0,04 \leq 0,04$		30...32

* дано розрахунковий хімічний склад і твердість натопленого металу.

більшу хімічну неоднорідність металу.

На рисунку 2 наведено гістограми розподілу величин струму та напруги, тобто частоти появи цих величин, розділеної по проміжках. Узагальнені розрахункові результати оцінки стабільності процесу натоплення різними дротами й якості топлення їх наведено у табл. 3.

З наведених даних видно, що характеристики топлення дротів трьох типів знаходяться приблизно на однаковому рівні, проте дроти №№1 і 2 із осердям у вигляді гранульованого порошку мають вищі на $\cong 25\%$ коефіцієнти розтоплення та натоплення у порівнянні з дротом-еталоном із шихтою з феростопів. Це позитивно позначається і на коефіцієнті втрат, який у 2,9...4,0 рази нижчий для дротів №№1 і 2 у порівнянні із дротом-еталоном №3.

Найбільш стабільним є процес натоплення дротом №1: він характеризується найменшим діапазоном коливань по величинам струму та напруги від заданого, що підтверджується гістограмами розподілу частоти фіксації відповідних параметрів (рис. 2) і коефіцієнтами їхньої варіації (табл. 2). Найменшою стабільністю характеризується процес натоплення дротом-еталоном №3 з осердям із феростопів.

Визначені залежності можуть бути пояснені різницею в типі шихтових компонентів у осерді порошкових дротів. Гранульований металевий порошок є більш чистим та однорідним за хімічним складом і фізичними властивостями (температурою топлення, електропровідністю, густиною) у порівнянні із порошками різних феростопів [17], які використовувались у осерді дроту-еталона, що, очевидно, буде впливати на кінетику процесу топлення.

Ліпші показники топлення та стабільності у дроту №1 у порівнянні з дротом №2, в осерді яких був гранульований порошок, може бути пояснено різницею у гранулометричному складі порош-

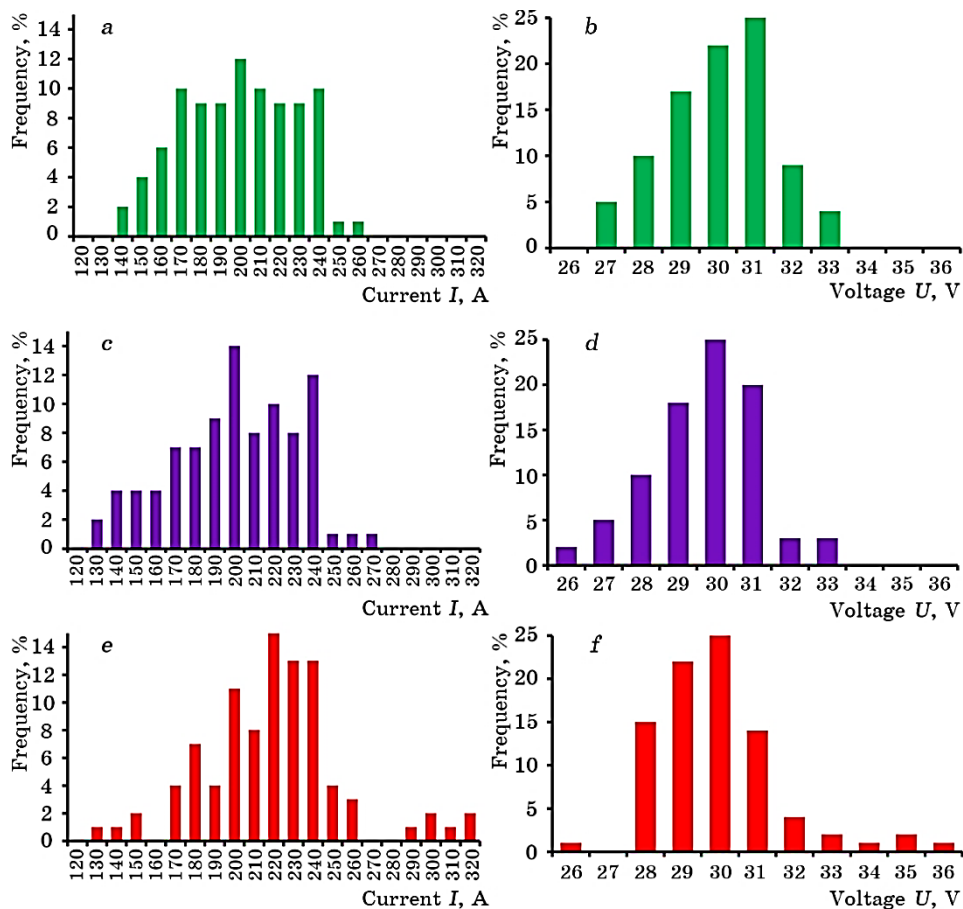


Рис. 2. Гістограми частоти розподілу значень струму (*a, c, e*) та напруги (*b, d, f*) за натоплення дротами №1 (*a, b*), №2 (*c, d*) та №3 (*e, f*).

Fig. 2. Histograms of the frequency distribution of current (*a, c, e*) and voltage (*b, d, f*) values under surfacing with wires №1 (*a, b*), №2 (*c, d*) and №3 (*e, f*).

ків. Як було зазначено вище, розмір частинок порошку в осерді дроту №1 був від 50 до 300 мкм (рис. 3, *a*), а в дроті №2 — 200...250 мкм (рис. 3, *b*).

На нашу думку, використання в осерді металопорошкових дротів компонентів майже однакової форми та розміру (200...250 мкм) за внутрішнього діаметра дроту у 1200 мкм під час виготовлення дроту призводить до утворення значної кількості пустот; коефіцієнт пакування частинок (η) складає 83,5% (рис. 3, *d*), що негативно впливає на кінетику топлення порошкового електродного дроту. За використання в осерді порошкових дротів частинок із широким

ТАБЛИЦЯ 3. Параметри якості топлення порошкових дротів і стабільності процесу.**TABLE 3.** Quality parameters of flux cored wires and process stability.

Параметер	Тип дроту		
	№1	№2	№3
Коефіцієнти, %:			
- розтоплення α_p	17,1	16,2	13,6
- натоплення α_n	16,8	15,8	12,6
- втрат ψ	1,75	2,47	7,35
Задана величина струму, А		200,0	
Мінімальне значення струму, А	136,4	127,8	128,6
Максимальне значення струму, А	252,0	266,0	312,0
Сер. квадр. відхилення по струму, А	27,51	28,67	34,60
Середнє значення струму, А	194,8	194,9	213,8
Коефіцієнт варіації по струму k_i , %	14,12	14,71	16,18
Задана величина напруги, В		28,0	
Мінімальне значення напруги, В	26,03	25,91	25,27
Максимальне значення напруги, В	32,39	32,72	36,41
Середньо квадратичний відхил по напрузі, В	1,47	1,38	1,79
Середнє значення напруги, В	29,19	29,45	29,46
Коефіцієнт варіації по напрузі k_u , %	4,73	4,99	6,08

діапазоном по гранулометричному складу (50...300 мкм) таких пустот утворюється значно менше, коефіцієнт пакування складає 93,3% (рис. 3, с), порошковий дріт є більш щільним та однорідним і топиться більш стабільно.

Дослідження мікроструктури зразків натопленого металу показало, що зона стоплення першого шару натопленого металу з металом основи в зразку №1 має ширину близько 20 мкм (рис. 4, а). Зони перегріву та неповного розтоплення мають товщини близько 100 мкм, на що вказують горизонтальні лінії в будові металу-основи. Структура натопленого металу поблизу лінії стоплення характеризується наявністю дрібних зерен стовпчастої орієнтації, які мають напрямок зростання перпендикулярно металу-основи — у напрямку тепловідведення. Вагомим у даному випадку є спостереження, що самі зерна первинного аустеніту формуються дрібними, а їхні межі залишаються малопомітними після розпаду на ферит і сорбітоподібний перліт (рис. 4, б).

Центральна частина натопленого металу (3–4-й шар) зразка №1 має майже однорідну будову первинно сформованих аустенітних зерен шириною у 40...60 мкм і довжиною у 200...400 мкм від третього до четвертого шару (рис. 4, с, d).

З віддаленням від металу-основи за розпаду аустеніту підвищується неоднорідність сорбітоподібного перліту та збільшується розмір феритної складової.

У п'ятому шарі межі зерен представлено виділеннями фериту, а також спостерігається формування мікрооб'ємів псевдоперліту

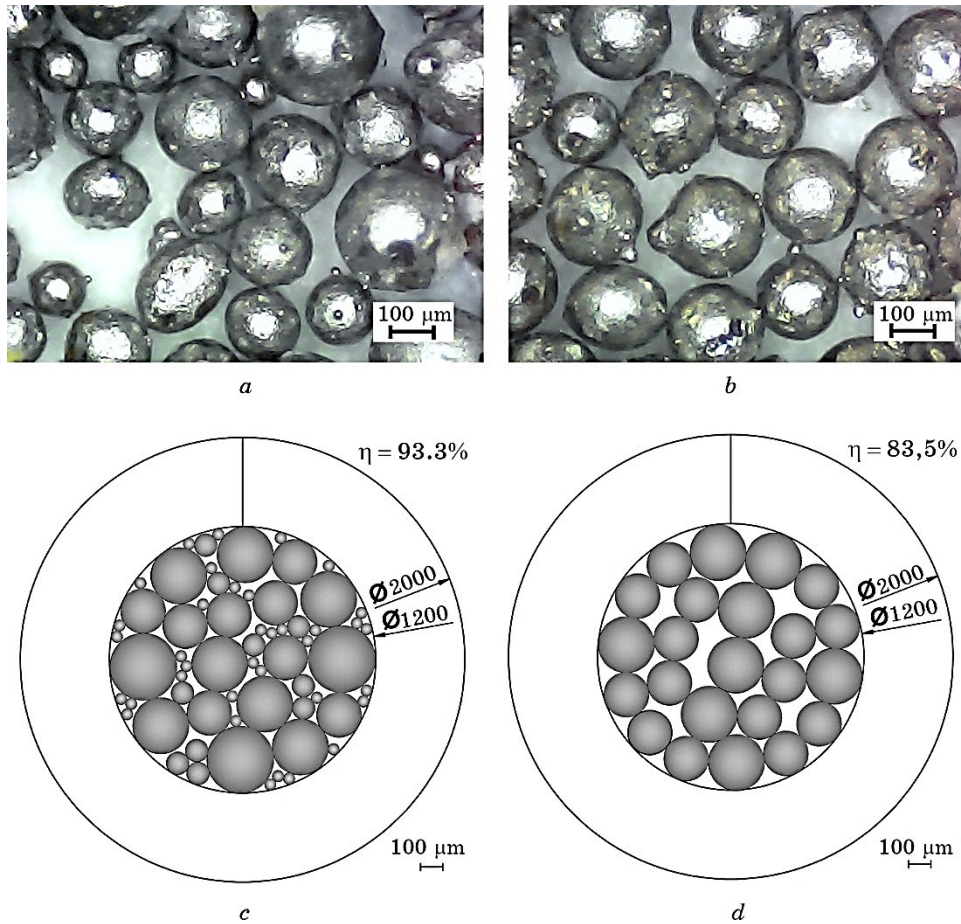


Рис. 3. Зовнішній вигляд зразків порошку Р6М5 (*a, b*) грануляцією у 50...300 мкм (*a*) та 200...250 мкм (*b*); модель розподілу частинок порошку шихти розмірами у 50...300 мкм (*c*) і 200...250 мкм (*d*) у осерді дроту зовнішнім діаметром у 2,0 мм, виготовленого зі стрічки товщиною у 0,4 мм.

Fig. 3. The appearance of samples of R6M5 powder (*a, b*) with granulation of 50...300 μm (*a*) and 200...250 μm (*b*); the pattern of distribution of particles of the charge powder with sizes of 50...300 μm (*c*) and 200...250 μm (*d*) in the core of a powder wire with an outer diameter of 2.0 mm, made of a tape with a thickness of 0.4 mm.

(рис. 4, *e, f*).

Ближче до верхнього краю натопленого металу, у ньому форму-

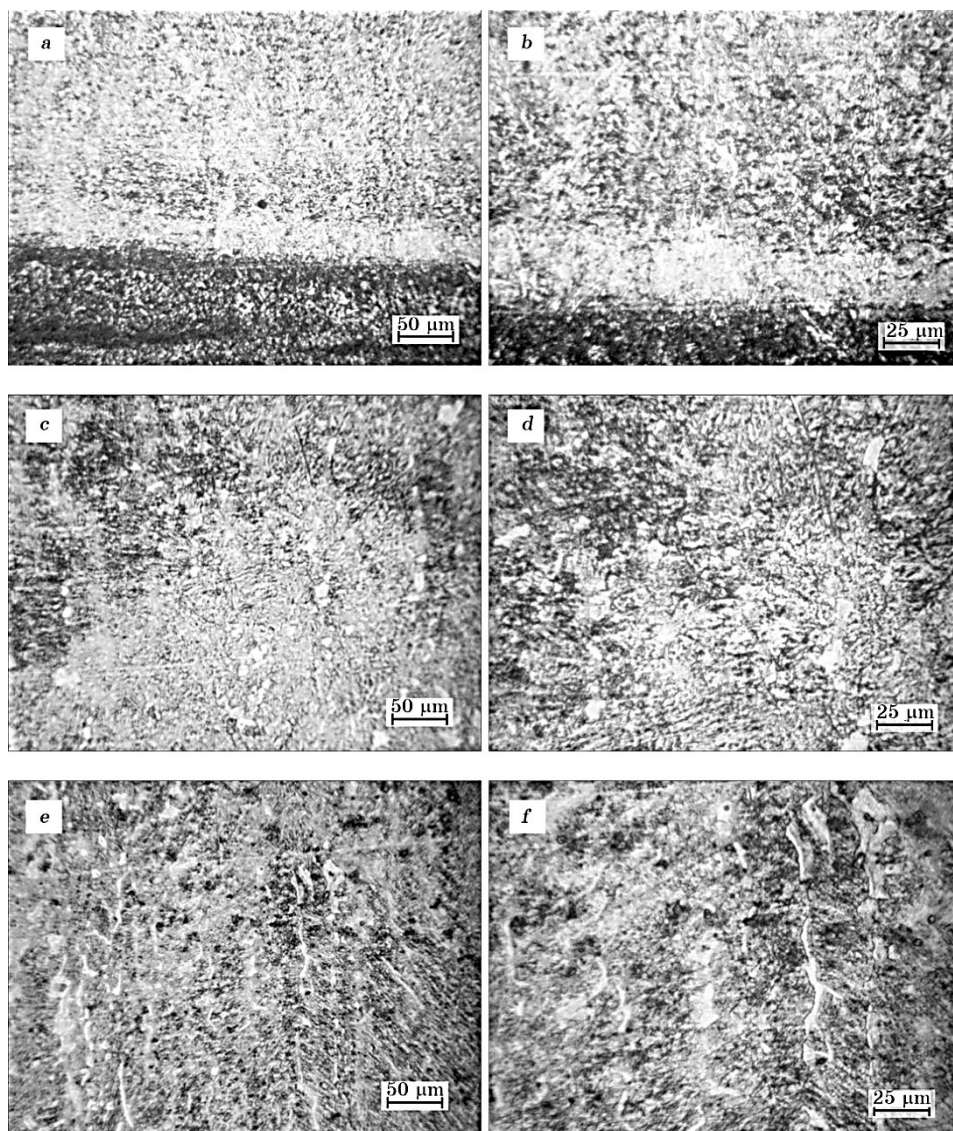


Рис. 4. Мікроструктура металу поблизу лінії стоплення першого натопленого шару (вгорі) та основного металу (внизу) (*a, b*), а також мікроструктура третього (*c, d*) та п'ятого (*e, f*) шарів натопленого металу у зразку №1.

Fig. 4. The microstructure of the metal near the fusion line of the first deposited layer (above) and the base metal (below) (*a, b*), and the microstructure of the third (*c, d*) and fifth (*e, f*) layers of the deposited metal in the sample №1.

ються рівновісні первинні зерна аустеніту, після розпаду яких утворюється дрібнодисперсна структура, схожа на суміш фериту та троститу гартування, що можна пояснити підгартуванням верхнього шару металу під час остигання зразка на спокійному повітрі.

Зразок №2 з більш рівномірним гранулометричним складом осердя порошкового дроту (200...250 мкм) має зону стоплення шириною у 20...25 мкм; ширина та протяжність первинних зерен аустеніту є меншою, ніж в попередньому зразку (близько 20 мкм і 150–200 мкм відповідно). В структурі наявні поодинокі крупні неметалеві включення (рис. 5, *a, b*), а сама вона представлена дрібнодисперсною сумішшю фериту, сорбітоподібного перліту та дрібнодисперсних карбідних включень. Такі відмінності можна пояснити меншою температурою розтопу зварювальної ванни під час натоплення, що зумовлено більш крупним гранулометричним складом осердя порошкового дроту №2. Очевидно, що за однакових енерговитрат розтоплення більшої кількості крупних частинок шихти металопорошкового дроту буде забирати більше енергії; тому температура такого розтопу буде дещо нижчою. Саме тому, через менший перегрів, буде утворюватися більш дрібнозерниста структура і так само через це розчинення або виведення неметалевих включень буде менш ефективним. Будова центральних шарів натопленого металу зразка №2 має теж змішану структуру колишніх первинних зерен (рис. 5, *c, d*). Мікроструктура цієї області так само характеризується пониженою рівномірністю та представлена крупними відокремленими ділянками фериту й сорбітоподібного перліту, як і в зразку №1. Окремі мікрооб'єми за своєю будовою більше нагадують перліт або псевдоперліт. Слід відзначити наявність пор і неметалевих включень. У верхній частині натопленого металу формуються рівновісні первинні зерна аустеніту (рис. 5, *e, f*). Отже, розглянуті характерні зони зразка №2 є схожими на аналогічні зони попереднього зразка. Характерною відмінністю тут можна назвати помітно високу кількість пор і неметалевих включень у зразку №2. Формування їх і залишок, як вже було сказано, є наслідком пониження температури зварювальної ванни, що пов'язане з використанням в осерді порошкового дроту більш крупних частинок.

Зразок №3 має найбільш виражену градієнтну структуру зони стоплення та неповного розтоплення, ширина яких складає 40...100 мкм (рис. 6, *a*), а більше значення відповідає осі, по якій у зварювальну ванну подавався топкий електродний порошковий дріт. Первинні аустенітні зерна натопленого металу мають будову та розміри, схожі на ті, якими характеризується зразок №1. Їхня ширина складає в середньому 25 мкм, а довжина — 20 мкм. Після розпаду аустеніт утворює більш крупну, ніж у попередніх зразків, суміш фериту та сорбітоподібного перліту (рис. 6, *b*). На це може впливати дещо підвищена кількість Силіцію в натопленому металі №3 як не-

карбідоутворювального феритного стабілізатора.

У будові нагрітого шару відмічено різноманітні мікроефекти — пори та крупні неметалеві включення. Будова центральних ша-

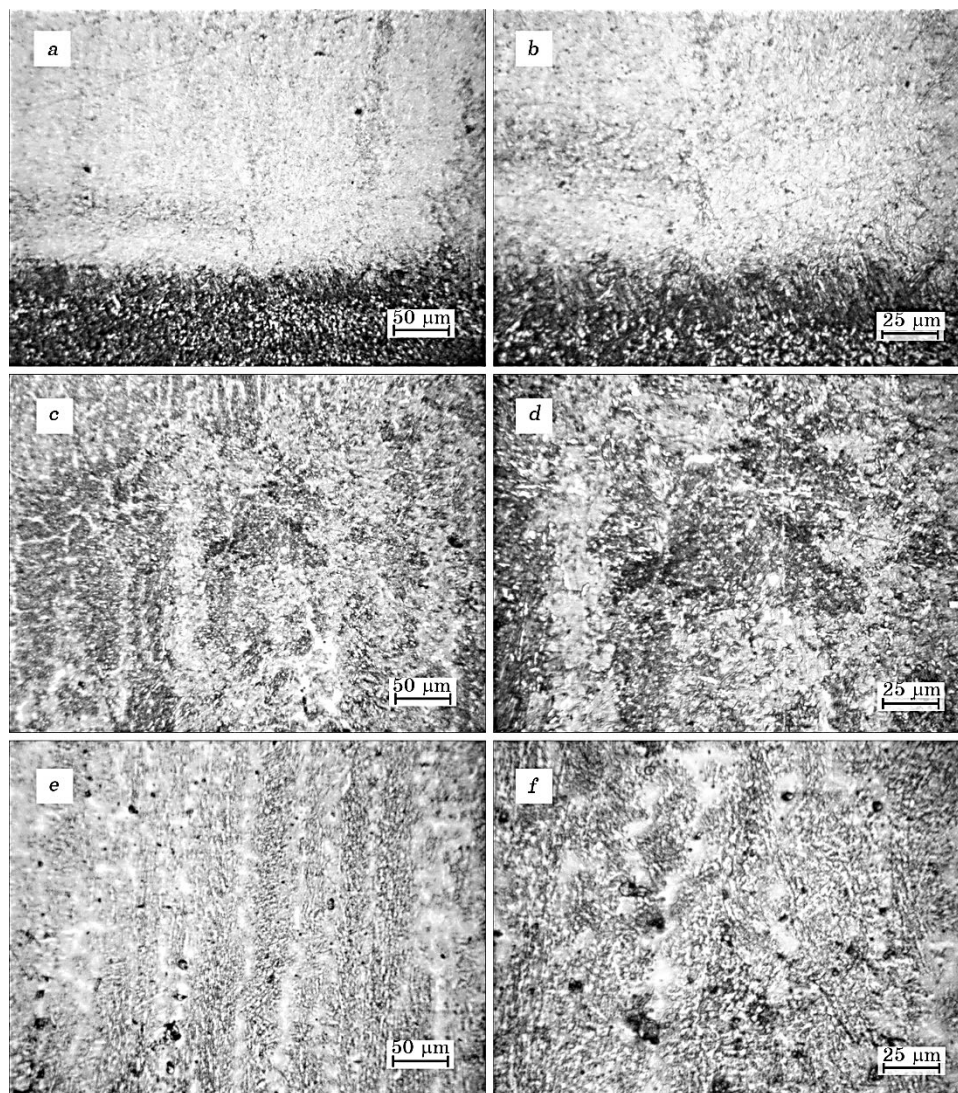


Рис. 5. Мікроструктура металу поблизу лінії стоплення першого нагрітого шару (вгорі) й основного металу (внизу) (*a, b*), а також мікроструктура третього (*c, d*) та п'ятого (*e, f*) шарів нагрітого металу у зразку №2.

Fig. 5. The microstructure of the metal near the fusion line of the first deposited layer (above) and the base metal (below) (*a, b*), and the microstructure of the third (*c, d*) and fifth (*e, f*) layers of the deposited metal in the sample №2.

рів нагрітого металу в зразку №3 має схожу будову первинно утворених зерен, порівняно з першими шарами.

Після розпаду аустеніту в третьому та четвертому шарах на ме-

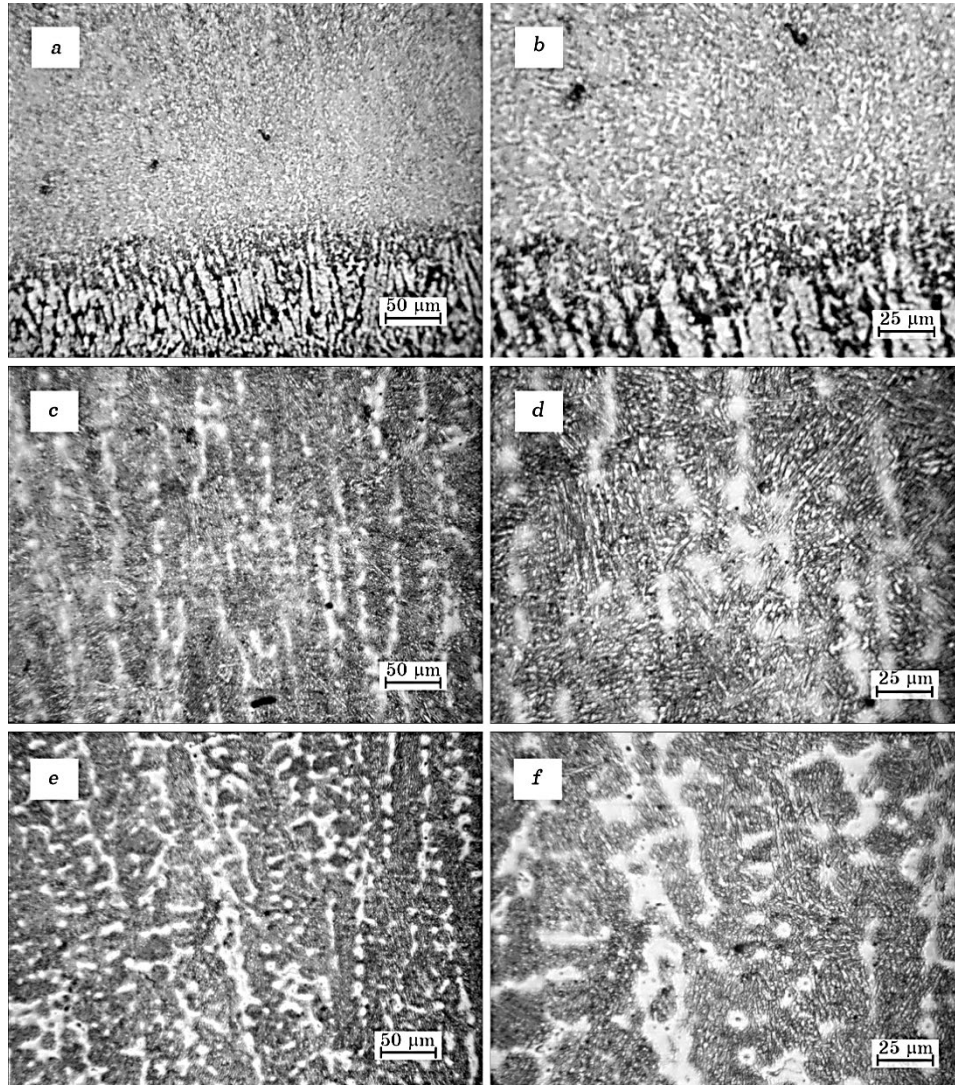


Рис. 6. Мікроструктура металу поблизу лінії стоплення першого нагрітого шару (вгорі) й основного металу (внизу) (*a, b*), а також мікроструктура третього (*c, d*) та п'ятого (*e, f*) шарів нагрітого металу у зразку №3.

Fig. 6. The microstructure of the metal near the fusion line of the first deposited layer (above) and the base metal (below) (*a, b*), and the microstructure of the third (*c, d*) and fifth (*e, f*) layers of the deposited metal in the sample №3.

жах його колишніх зерен утворюється велика кількість крупних ділянок фериту (рис. 6, *c*, *d*). Таке явище ймовірніше за все є результатом нерівномірного розподілу різних компонентів (феростопів) шихти металопорошкового дроту №3. Зокрема, збільшення феритних ділянок найбільше пов'язане з підвищеною концентрацією Силіцію й інших феритостабілізуювальних елементів.

Вказана особливість неоднорідності хемічного складу дроту з феростопним наповненням ще більш контрастно проявляється у верхніх шарах (рис. 6, *e*, *f*). Водночас, аустеніт у них має дендритну будову, що вказує на більшу тривалість кристалізації та можливе утворення евтектики. Більш тривала кристалізація верхніх нагрітих шарів також підтверджується утворенням структури, яка більше схожа на перліт або сорбітоподібний перліт окремо від фериту. У верхніх шарах також відзначено велику кількість мікродфектів, які являють собою неметалеві включення та, зрідка, пори.

Треба відзначити наявність у центральній частині нагрітого металу зразка №3 розмежування структури (рис. 7, *a*) та нерозтоплених фрагментів порошкового дроту (рис. 7, *b*), що вказує на неоднорідність хемічного складу шихтової суміші металопорошкового нагрітого дроту, осердя якого складається із феростопів.

Загалом, можна сказати, що нагрітий метал зразка №3 має найбільш неоднорідну будову, що пов'язане з типом обраної шихти для виробництва нагрітого дроту — різних феростопів. Неоднорідний хемічний склад і фізичні властивості феростопів, а також більша кількість домішок у них, зокрема Силіцію, сприяє утворенню такої більш неоднорідної структури та підвищенню кількості де-

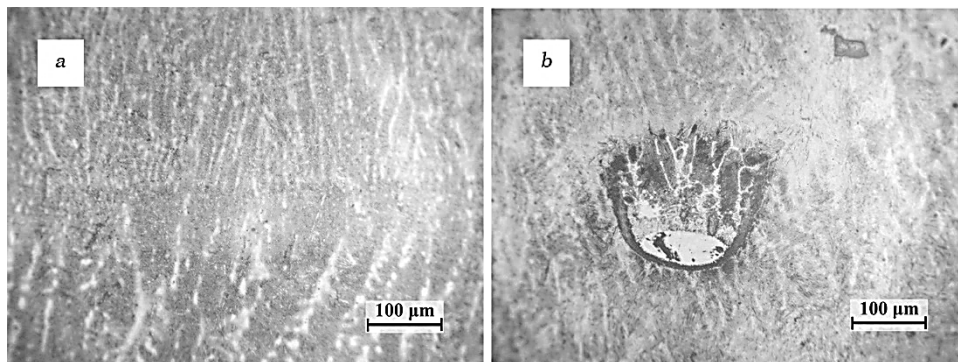


Рис. 7. Мікроструктура центральної частини нагрітого металу в зразку №3 із вираженим розмежуванням структури (*a*) та нерозтопленими включеннями осердя порошкового дроту (*b*).

Fig. 7. Microstructure of the central part of the deposited metal in sample №3 with pronounced demarcation of the structure (*a*) and unfused inclusions of the flux cored wire (*b*).

фектів і неметалевих включень зразка, нагрітого дротом з феростопною шихтою.

Аналіза розподілу мікротвердості по висоті шарів нагрітого металу в зразках №№1–3 показала (рис. 8), що мікротвердість основного металу біля лінії стоплення у всіх зразках приблизно однакова та становить $HV1\ 1280\ldots1320$ МПа. Мікротвердість в першому нагрітому шарі становить: в зразку №1 — $HV1\ 1910\ldots2230$ МПа, №№2 та 3 — $HV1\ 1850\ldots2150$ МПа. В центральній частині нагрітого металу (3-й шар) мікротвердість зразка №1 становить $HV1\ 2400\ldots2500$ МПа, зразка №2 — $HV1\ 2300\ldots2410$ МПа, зразка №3 — $HV1\ 2330\ldots2450$ МПа. В останньому, п'ятому, нагрітому шарі мікротвердість зразка №1 становить $HV1\ 2600\ldots2670$ МПа, № 2 —

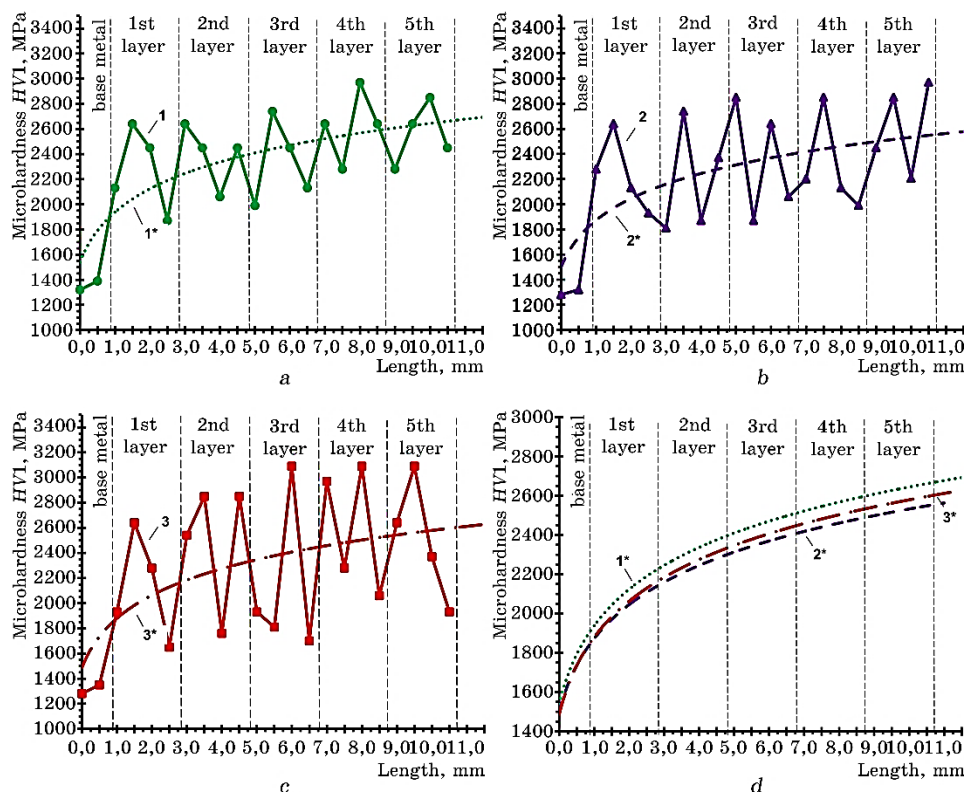


Рис. 8. Розподіл мікротвердості по шарах нагрітого металу зразків №1 (a), №2 (b), №3 (c) та регресійні рівняння (1^* – 3^*) одержаних залежностей (d).

Fig. 8. Distribution of microhardness in the layers of deposited metal of samples №1 (a), №2 (b), №3 (c), and regression equations (1^* – 3^*) of the obtained dependences (d).

HV1 2500...2550 МПа, № 3 — HV1 2530...2600 МПа.

Результати мікродюрOMETричних мірянь структурних складових у окремих ділянках зразка №3 показали, що твердість яскраво виражених лікваций залишкового аустеніту становить *HV1 2540...2740 МПа*, а твердість феритної складової набагато вища — *HV1 3220...3830 МПа* (рис. 6, *f*). Мікротвердість феритної складової у аналогічній зоні зразків №1 і 2 (рис. 4, *f* і 5, *f*) складає *HV1 2640...2970 МПа*, а залишкового аустеніту — *HV1 2060...2280 МПа*; та водночас важливо, що структура зразків №1 і 2 є більш однорідною і в ній такі ліквацийні ділянки менш виражені у порівнянні зі зразком №3.

Таким чином, визначено, що ферит, який оточує зерна колишнього аустеніту, має більші значення мікротвердості. Це означає, що він має високий ступінь леґованості феритними стабілізаторами — Хромом, Ванадієм, Молібденом, Силіцієм і Вольфрамом. Високий вміст їх у окремих ділянках зразка №3 у порівнянні зі зразками №№1 і 2 може пояснюватися неповним розтопленням компонентів шихти, яка складається із різних феростопів, недостатньою гомогенізацією хемічного складу утворюваних мікрооб'ємів розтопу та, як наслідок, — утворенням лікваций. Високий ступінь леґування фериту є одним з чинників його високої твердості. Додатковим чинником також може виступати наявність у фериті дрібних карбідів, які могли як утворитися в феритних зернах, так і перейти до їхнього складу з феростопів за рахунок неповного розтоплення їх і розчинення.

Експериментально визначено, що мікротвердість у зразка №1 трохи вище за показниками у порівнянні зі зразками №№2 й 3. Окрім того, показники мікротвердості зразка №1 характеризуються меншою величиною дисперсії, що може бути пояснено особливостями характеристик осердя дослідних порошкових дротів, описаними вище та, як наслідок, більшою стабільністю у процесі нагрівання дротом №1. Високий структурний й, очевидно, хемічний ступінь неоднорідності нагрітого металу №3 може негативно сказатися на його експлуатаційних властивостях, особливо якщо подібні деталі будуть працювати в умовах абразивного чи втомного зношування.

4. ВИСНОВКИ

1. Експериментально визначено, що тип і ґранулометричний склад металевих компонентів осердя металопорошкових дротів мають значний вплив на характеристики та стабільність процесу електродугового нагрівання металопорошковими дротами, що, як наслідок, позначається на характеристиках нагрітого металу та його структури.

2. Використання в якості осердя порошкових дротів ґранульованих стопів, хемічно більш чистих і більш однорідних за фізичними властивостями, уможлиблює підвищити зварювально-технологічні властивості порошкових дротів на 20...30% у порівнянні із дротом-еталоном, в осерді якого використовувалися стандартні феростопи. Водночас, найбільшою стабільністю відзначено порошкові дроти, ґранулометричний склад осердя яких знаходиться в межах 50...30 мкм і які характеризуються вищим коефіцієнтом пакування.

3. Вищезазначені особливості приводять до деякого підвищення мікротвердості металу, більшої однорідності його структури та зменшення кількості мікродефектів під час натоплення дротами із осердям з ґранульованих стопів у порівнянні із металом аналогічного хемічного складу, натопленого порошковим дротом з феростопною шихтою в осерді.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. I. Ryabtsev, S. Fomichov, V. Kuznetsov, Y. Chvertko, and A. Banin, *Electric Arc Surfacing. Surfacing and Additive Technologies in Welded Fabrication* (Cham, Switzerland: Springer: 2023).
2. Д. Л. Луцак, П. М. Присяжнюк, М. О. Карпаш, В. М. Пыльпий, В. О. Коцюбинський, *Металлофиз. новейшие технол.*, **38**, №9: 1265 (2016).
3. Т. В. Тарасова, Е. В. Попова, *Металлофиз. новейшие технол.*, **35**, №11: 1487 (2013).
4. I. A. Ryabtsev, A. I. Panfilov, A. A. Babinets, I. I. Ryabtsev, G. N. Gordan, and I. L. Babichuk, *The Paton Welding J.*, Nos. 5–6: 78 (2015).
5. L. M. Lobanov, I. O. Ryabtsev, M. O. Pashchyn, A. A. Babinets, O. M. Syzonenko, I. I. Ryabtsev, I. P. Lentuygov, A. S. Torpakov, and O. L. Mikhodui, *Strength Mater.*, **55**: 469 (2023).
6. Н. В. Pokhmurs'ka, М. У. Holovchuk, У. В. Dz'oba, В. М. Hvozdet's'kyi, and L. V. Dzyubyk, *Mater. Sci.*, **53**: 868 (2018).
7. В. Д. Кузнецов, Д. В. Степанов, В. В. Перемітько, О. Л. Косинська, А. І. Панфілов, І. В. Коломоець, *Металофиз. новітні технол.*, **42**, №8: 1107 (2020).
8. V. O. Lebedev and S. V. Novykov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 3: 419 (2022).
9. S. Schwab, R. Selin, and M. Voron, *Weld World*, **67**: 981 (2023).
10. M. Gasik, V. Dashevskii, and A. Bizhanov, *Ferroalloys: Theory and Practice* (Switzerland: Springer Nature: 2020).
11. I. A. Ryabtsev, *The Paton Welding J.*, No. 11: 8 (2006).
12. И. А. Кондратьев, *Порошковая проволока, заполненная гранулированным сплавом. Наплавка. Технологии, материалы, оборудование: Сб. статей* (Київ: ИЭС им. Е. О. Патона НАН України: 2015).
13. I. A. Ryabtsev, E. F. Pereplyotchikov, I. V. Mits, and I. A. Bartenev, *The Paton Welding J.*, No. 10: 18 (2007).
14. A. P. Zhudra, S. Yu. Krivchikov, and V. I. Dzykovich, *The Paton Welding J.*, No. 12: 36 (2014).
15. A. P. Zhudra, S. Yu. Krivchikov, and V. V. Petrov, *The Paton Welding J.*, No. 11:

- 43 (2006).
16. И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков, *Сварка порошковой проволокой* (Киев: Наукова думка: 1972).
 17. В. П. Пиптюк, А. Ф. Петров, С. В. Греков, В. А. Буршитин, *Физико-химическая оценка свойств промышленных ферросплавов. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр.* (Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины: 2007), № 14, с. 235.

REFERENCES

1. I. Ryabtsev, S. Fomichov, V. Kuznetsov, Y. Chvertko, and A. Banin, *Electric Arc Surfacing. Surfacing and Additive Technologies in Welded Fabrication* (Cham, Switzerland: Springer: 2023).
2. D. L. Lutsak, P. M. Prysyazhnyuk, M. O. Karpash, V. M. Pylypiv, and V. O. Kotsyubynsky, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 9: 1265 (2016) (in Russian).
3. T. V. Tarasova and E. V. Popova, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **35**, No. 11: 1487 (2013) (in Russian).
4. I. A. Ryabtsev, A. I. Panfilov, A. A. Babinets, I. I. Ryabtsev, G. N. Gordan, and I. L. Babichuk, *The Paton Welding J.*, Nos. 5–6: 78 (2015).
5. L. M. Lobanov, I. O. Ryabtsev, M. O. Pashchyn, A. A. Babinets, O. M. Syzonenko, I. I. Ryabtsev, I. P. Lentyugov, A. S. Torpakov, and O. L. Mikhodui, *Strength Mater.*, **55**: 469 (2023).
6. H. V. Pokhmurs'ka, M. Y. Holovchuk, Y. V. Dz'oba, V. M. Hvozdet's'kyi, and L. V. Dzyubyk, *Mater Sci*, **53**: 868 (2018).
7. V. D. Kuznetsov, D. V. Stepanov, V. V. Peremitko, O. L. Kosynska, A. I. Panfilov, and I. V. Kolomoiets, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 8: 1107 (2020) (in Ukrainian).
8. V. O. Lebedev and S. V. Novykov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 3: 419 (2022).
9. S. Schwab, R. Selin, and M. Voron, *Weld World*, **67**: 981 (2023).
10. M. Gasik, V. Dashevskii, and A. Bizhanov, *Ferroalloys: Theory and Practice* (Switzerland: Springer Nature: 2020).
11. I. A. Ryabtsev, *The Paton Welding J.*, No. 11: 8 (2006).
12. I. A. Kondratyev, *Poroshkovaya Provoloka, Zapolnennaya Granulirovannym Splavom* [Flux-Cored Wire Filled with Granular Alloy] (Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine: 2015) (in Russian).
13. I. A. Ryabtsev, E. F. Pereplyotchikov, I. V. Mits, and I. A. Bartenev, *The Paton Welding J.*, No. 10: 18 (2007).
14. A. P. Zhudra, S. Yu. Krivchikov, and V. I. Dzykovich, *The Paton Welding J.*, No. 12: 36 (2014).
15. A. P. Zhudra, S. Yu. Krivchikov, and V. V. Petrov, *The Paton Welding J.*, No. 11: 43 (2006).
16. I. K. Pokhodnya, A. M. Suptel, and V. N. Shlepakov, *Svarka Poroshkovoy Provolokoy* [Welding with Flux-Cored Wire] (Kiev: Naukova Dumka: 1972) (in Russian).
17. V. P. Pipyuk, A. F. Petrov, S. V. Grekov, and V. A. Burshitin, *Fiziko-Khimicheskaya Otsenka Svoistv Promyshlennykh Ferrosplavov* [Physico-Chemical Assessment of the Properties of Industrial Ferroalloys] (Dnepropetrovsk: Iron and Steel Institute, N.A.S. of Ukraine: 2007), No. 14, p. 235 (in Russian).