

УДК 621.791.92

## ПЛАЗМОВО-ПОРОШКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ НА МІДЬ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ І КОБАЛЬТУ

*І. О. РЯБЦЕВ, Є. Ф. ПЕРЕПЛЬОТЧИКОВ, А. А. БАБІНЕЦЬ,  
І. І. РЯБЦЕВ, І. П. ЛЕНТЮГОВ, І. Л. БОГАЙЧУК*

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ*

Подано результати досліджень формування наплавленого металу та його з'єднання з основним за плазмового наплавлення на мідь порошками на основі нікелю або кобальту. Встановлено, що найкращі результати з огляду на зварювально-технологічні властивості забезпечує порошок ПГ-СР4 на основі нікелю. За використання порошку ПН-АН34 виявлено окремі дефекти в наплавленому металі у вигляді прошарків та окремих включень міді у шарі наплавленого металу на основі кобальту.

**Ключові слова:** *наплавлення на мідь, плазмово-порошкове наплавлення, сплави на основі нікелю та кобальту, зона сплавлення.*

The results of studies of the formation of deposited metal and its joints with base and deposited metals during plasma surfacing on copper with powders that ensure the production of wear-resistant deposited metal based on nickel or cobalt are presented. It is established that nickel-based ПГ-СР4 powder provides the best results regarding welding and technological properties. When using ПН-АН34 powder, which provides the production of deposited metal based on cobalt, individual defects are found in the deposited metal in the form of interlayers and individual inclusions of copper in the deposited layer based on cobalt.

**Keywords:** *surfacing on copper, plasma-powder surfacing, nickel- and cobalt-based alloys, weldability, fusion zone.*

**Вступ.** Відомо, що мідь завдяки її фізико-механічним властивостям широко використовують для виготовлення фурм доменних печей і конверторів, кристалізаторів різної форми та розмірів, теплообмінників, хімічної апаратури тощо. З іншого боку, низькі жаро- і зносостійкість, а також жароміцність міді призводить до того, що деякі зі згаданих деталей, зокрема кристалізатори і фурми, які експлуатують в умовах контакту з розплавленим металом високотемпературними газовими потоками і абразивами різної твердості, швидко виходять з ладу та вимагають заміни [1].

Для підвищення службових характеристик поверхневих шарів деталей використовують наплавлення на них зносостійких сплавів на основі нікелю, кобальту тощо [2]. Однак таке наплавлення на мідь, на відміну від наплавлення на сталь, пов'язано з великими труднощами [3, 4] через те, що сплави на основі нікелю або кобальту мають суттєво вищу температуру плавлення, менші теплопровідність і коефіцієнт термічного розширення (КТР) та інші фізико-механічні характеристики, які суттєво відрізняються від аналогічних характеристик міді (табл. 1).

Ці відмінності негативно впливають на зварюваність згаданих сплавів з міддю, а саме: відносно низька температура плавлення міді може призводити до її значного або навіть наскрізного проплавлення та до перемішування з наплавленим металом і погіршення службових характеристик останнього; висока теплопровідність міді призводить до великих швидкостей охолодження наплавленого

ної деталі та необхідності застосування джерел зварювального нагріву з великою погонною енергією, або використання попереднього та супутнього підігріву мідних деталей, а іноді й того, й іншого; великий КТР міді, що може спричинити високі залишкові напруження та суттєві деформації, а також появу тріщин; суттєва плинність рідкої міді, яка може погіршити формування наплавленого металу; окиснюваність міді у розплавленому стані, що призводить до утворення легкоплавких евтектик, які знижують тріщиностійкість міді [4].

**Таблиця 1. Теплофізичні характеристики міді, нікелю і кобальту [5]**

Показник	Cu	Ni	Co
Атомна маса	63,54	58,69	58,93
Температура плавлення, °C	1083	1453	1494
КТР, $\times 10^{-6}$ , 1/K	17,06	13,6	12,5
Теплопровідність, W/(m·K)	413	107	122
Питома теплоємність, J/(kg·K)	385	500	244
Питомий електроопір, $\times 10^{-8}$ ; $\Omega \cdot m$	1,68	6,99	5,68
Густина, kg/m <sup>3</sup>	8930	8900	8900

Як показує досвід [6, 7], досить широкі можливості для нанесення зносостійких покриттів на мідь та мідні деталі має плазмово-порошкове наплавлення. Завдяки можливості регулювання в широкому діапазоні співвідношення між тепловою потужністю плазмової дуги та масовою подачею присадного матеріалу (порошку) воно забезпечує достатню продуктивність (до 10 kg/h) за мінімального перемішування основного та наплавленого металу (5...10%), що особливо важливо за наплавлення матеріалів на основі нікелю або кобальту на мідь.

Мета роботи – дослідити особливості формування наплавленого металу і з'єднання його з основним за плазмового наплавлення на мідь порошками на основі нікелю або кобальту та розробити на цій основі технології наплавлення.

**Матеріали та методики експериментів.** Для наплавлення зразків використовували універсальну установку ОБ-2184 конструкції Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона для плазмово-порошкового наплавлення, яка укомплектована джерелом живлення – випрямлячем ВДУ-506.

Для експериментів з плазмового наплавлення на мідну основу використовували порошки сплавів на основі нікелю або кобальту (табл. 2).

**Таблиця 2. Хімічний склад порошків сплавів на основі нікелю та кобальту і твердість наплавленого ними металу [6]**

Марка порошку	C	Cr	Si	Fe	Ni	Co	B	Інші	Твердість, HRC
	mass%								
ПГ-CP4	0,6...1	15...18	3...4,5	$\leq 5$	Основа	–	2,8...3,8	–	55...60
ПН-АН34	0,7...1	28...32	1,5...2,5	$\leq 3$	4...8	Основа	0,5...0,9	4...5 W	45...50

Ці типи порошків обрали для досліджень через вимоги до згаданих вище службових характеристик мідних деталей.

Використання порошку ПГ-CP4 за плазмового наплавлення забезпечує отримання наплавленого металу типу 100X17H70C4P4. Сплави цього типу відомі під торговою маркою “колмоной”, вони мають високу зносостійкість за сухого тертя

металу по металу і не схильні до утворення задирок за температури поверхонь тертя до 585°C. Крім того, вони відрізняються високими жаростійкістю і жароміцністю та стійкістю за гідроабразивного та ерозійного зношування [6–9].

Порошок ПН-АН34 за плазмового наплавлення забезпечує отримання наплавленого металу типу кобальтового стеліту. Кобальтові стеліти характеризуються високими зносостійкістю за нормальної і підвищеної температур, жароміцністю та жаростійкістю [6].

Використовуючи порошки ПГ-СР4 і ПН-АН34, експериментували з відпрацюванням технології плазмово-порошкового наплавлення пластин з міді М1 завтовшки 10 mm і циліндричних мідних зразків  $\varnothing$  150 mm з товщиною стінки 8 mm. Після наплавлення візуально оцінювали якість формування наплавлених валиків, присутність у них дефектів, а потім виготовляли поперечні макрошліфи, за якими визначали ширину й висоту валика, а також глибину проплавлення основного металу.

Металографічні дослідження зразків, вирізаних з наплавлених заготовок, виконували на оптичному мікроскопі Neophot-32. Виготовляли шліфи за стандартними методиками. Зображення структури металу отримували за допомогою цифрової фотокамери Olympus C5050. Вимірювали мікротвердість структурних складників наплавленого металу за Вікерсом мікротвердоміром Лесо М-400. Для аналізу хімічного складу окремих складників використовували растровий електронний мікроскоп SEM-515 фірми PHILIPS, оснащений енергодисперсійним мікроаналізатором хімічних елементів.

**Результати експериментів та їх обговорення.** В результаті експериментів вибрали такі технологічні режими плазмового наплавлення порошками ПГ-СР4 та ПН-АН34 на пластини з міді М1: струм 200...220 А; швидкість наплавлення 7 m/h; подача порошку 2,5 kg/h; загальні витрати плазмоутворювального, транспортного та захисного газу (аргону) 20...23 l/min; відстань від плазмотрона до виробу  $h = 8...10$  mm; амплітуда й частота коливань плазмотрона  $a = 8$  mm,  $f = 60 \text{ min}^{-1}$ . Для запобігання утворенню тріщин використовували попередній підігрів мідних пластин до 300°C. Під час наплавлення через перегрів мідної пластини наплавлені валики розширювалися. Для запобігання розтікання наплавлених валиків зменшували струм наплавлення до 170...180 А.

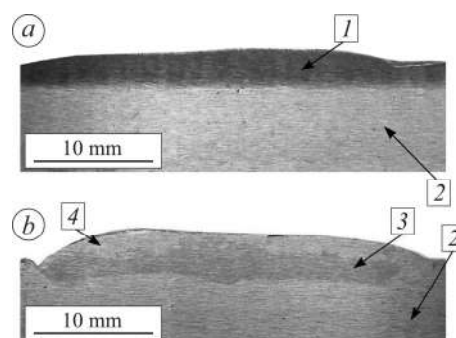
Макрошліфи поперечного перерізу валиків, наплавлених плазмовим способом порошками ПГ-СР4 та ПН-АН34, наведені на рис. 1а, б.

Рис. 1. Макрошліфи валиків, наплавлених плазмовим способом з присадкою порошків на основі нікелю (а) та кобальту (б):

1 – наплавлений метал на основі нікелю;  
2 – мідна основа; 3 – наплавлений метал на основі кобальту; 4 – прошарок міді.

Fig. 1. Macro-sections of rollers, deposited by the plasma method with the addition of powders based on nickel (a) and cobalt (b):

1 – deposited nickel-based metal;  
2 – copper base; 3 – surfacing metal based on cobalt; 4 – copper layer.



Наплавлення порошком ПГ-СР4 на основі нікелю характеризується хорошим формуванням, гладкою поверхнею з невеликими лусочками й невеликою глибиною проплавлення основного металу, яка не перевищує 0,8 mm. Висота

наплавленого шару становить 2,2 mm. Мідні включення в наплавленому металі відсутні (рис. 1a), а його твердість 56...58 HRC.

За використання порошку марки ПН-АН34 на основі кобальту зафіксовано перемішування міді з наплавленим металом і її витиснення у верхню зону наплавленого шару. Тут глибина проплавлення суттєво більша – 1,7 mm, і шар наплавленого металу утворює подекуди прошарок між основним металом і витиснутим у верхню область шаром міді (рис. 1b). Загальна висота наплавленого шару 2,5 mm, а його твердість 48...50 HRC.

Отже, за плазово-порошкового наплавлення на мідні пластини за якістю сплавлення найкращі результати показав порошок на основі нікелю. При цьому слід зазначити, що мідна пластина завтовшки 8 mm після такого наплавлення поздовжньо й поперечно деформована (рис. 2) максимально 1,5 і 3,3 mm, відповідно. За промислового наплавлення конкретних деталей необхідно враховувати ці деформації й вживати заходів зі зниження їх впливу на форму й експлуатаційні характеристики деталей.

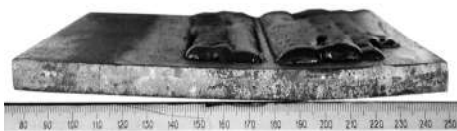


Рис. 2. Деформація мідної пластини після плазового наплавлення порошком ПГ-CP4.

Fig. 2. Deformation of the copper plate after plasma surfacing with ПГ-CP4 powder.

Металографічні дослідження показали такі результати. Лінія сплавлення в зразку, наплавленого плазовим способом порошком ПГ-CP4 на основі нікелю, хвиляста (рис. 3a). З боку мідної основи, вглиб від лінії сплавлення утворюється дифузійна зона завширшки 150...200  $\mu\text{m}$  з твердістю  $HVI = 954 \text{ MPa}$ . На відстані  $> 200 \mu\text{m}$  від лінії сплавлення показники твердості такі ж, як і в основному металі – міді М1 ( $HVI = 876 \text{ MPa}$ ). З боку наплавленого металу, вглиб від лінії сплавлення утворюється дифузійна зона змінної ширини 50...250  $\mu\text{m}$  із твердістю 1870...3510 MPa.

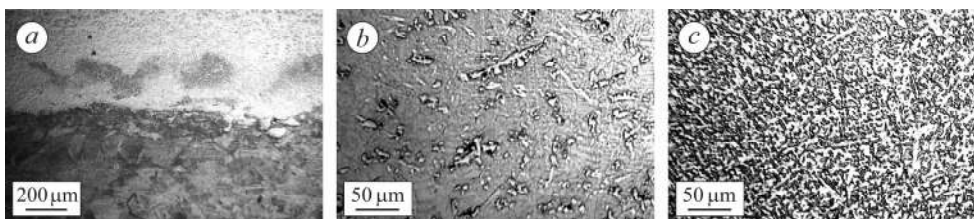
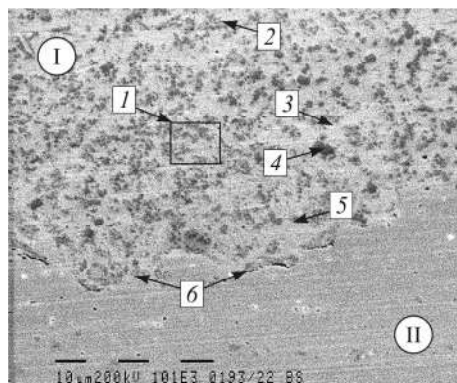


Рис. 3. Мікроструктура зони сплавлення (a), центральної (b) і верхньої (c) частини металу, наплавленого порошком ПГ-CP4 на основі нікелю; a –  $\times 50$ ; b, c –  $\times 200$ .

Fig. 3. Microstructure of fusion zone (a), central (b) and upper (c) parts of metal deposited with nickel-based ПГ-CP4 powder; a –  $\times 50$ ; b, c –  $\times 200$ .

Далі вглиб наплавленого металу структура складається із твердого розчину, збагаченого легувальними елементами й дисперсними карбідними включеннями. Цей розчин має твердість  $HVI = 7720 \text{ MPa}$ . Мікроструктура центральної частини наплавленого металу (рис. 3b) – лита матриця з дендритною будовою із твердістю  $HVI = 8240...8350 \text{ MPa}$ . У металі виділяються карбіди різної геометричної форми. Верхня частина наплавленого металу має дрібнішу структуру, у ній також відзначені голчасті дисперсні карбіди (рис. 3c).

На рис. 4 наведена мікроструктура зони сплавлення зразка, наплавленого плазмовим способом порошком ПГ-СР4 на основі нікелю, з локальним хімічним аналізом.



Елементи	mass%				
	1	2	3	4	5
Si	1,62	3,96	1,32	0,38	0,78
Cr	9,61	1,74	1,51	87,93	0,93
Fe	2,36	3,07	1,68	1,5	1,69
Ni	40,8	82,7	32,76	5,46	30,92
Cu	45,61	8,53	62,73	3,68	65,68

Рис. 4. Мікроструктура зони сплавлення зразка, наплавленого плазмовим способом порошком ПГ-СР4 на основі нікелю, з локальним хімічним аналізом:  
1 – аналіз з ділянки; 2, 3 – основа сплаву  $\approx 80$  і  $30 \mu\text{m}$  від лінії сплавлення, відповідно;  
4 – включення; 5 – основа сплаву  $\approx 5 \mu\text{m}$  від лінії сплавлення;  
6 – лінія сплавлення. I – нікелевий сплав; II – мідь.  $\times 1000$ .

Fig. 4. Microstructure of the fusion zone of the sample, deposited by the plasma method with nickel-based ПГ-СР4 powder with local chemical analysis: 1 – area analysis;  
2, 3 – alloy base  $\approx 80 \mu\text{m}$  and  $30 \mu\text{m}$  from the fusion line, respectively; 4 – inclusion;  
5 – alloy base  $\approx 5 \mu\text{m}$  from the fusion line; 6 – fusion line.  
I – nickel alloy; II – copper.  $\times 1000$ .

Аналіз результатів показує, що в шарі, наплавленому таким порошком, є мідь. Її вміст змінюється від 65,7 mass% на відстані  $5 \mu\text{m}$  від лінії сплавлення (5) до цілком прийняттого рівня – 8,5 mass% на відстані  $80 \mu\text{m}$  від лінії сплавлення (2). Високий вміст міді у наплавленому металі пояснюємо тим, що в системі Cu–Ni обидва метали мають необмежену взаємну розчинність у рідкому стані [10]. Темні включення (4) у структурі наплавленого металу є складними карбідами хрому.

Лінія сплавлення у зразку за наплавлення плазмовим способом порошком на основі кобальту ПН-АН34 також хвиляста із затіканнями наплавленого металу в мідну основу (рис. 5a). В основному металі на межі сплавлення утворюється велика кількість окремих включень наплавленого металу, як у вигляді дрібних глобулей  $\varnothing 5 \dots 10 \mu\text{m}$ , так і у вигляді крапель витягнутої форми розмірами  $150 \dots 350 \mu\text{m}$ . Твердість таких частинок  $HVI = 6060 \text{ MPa}$ .

Дифузійна зона в цьому зразку зміщена у бік основного металу. У мідній основі структура лінії сплавлення відрізняється від основного металу – у ній утворюється дифузійна зона з дисперсною структурою завширшки  $150 \dots 350 \mu\text{m}$  з твердістю  $HVI = 1030 \dots 1080 \text{ MPa}$ .

Структура наплавленого металу (рис. 5b) лита і є твердим розчином, збагаченим легувальними елементами. Твердість наплавленого металу біля лінії сплавлення  $HVI = 6060 \dots 6130 \text{ MPa}$ .

Біля поверхні наплавленого шару є великі включення основного металу, що ймовірно “спливли” під час кристалізації. Також на поверхні наплавленого металу утворилася широка зона литого металу на основі міді з розчиненим у ній наплавленим металом (рис. 5c).

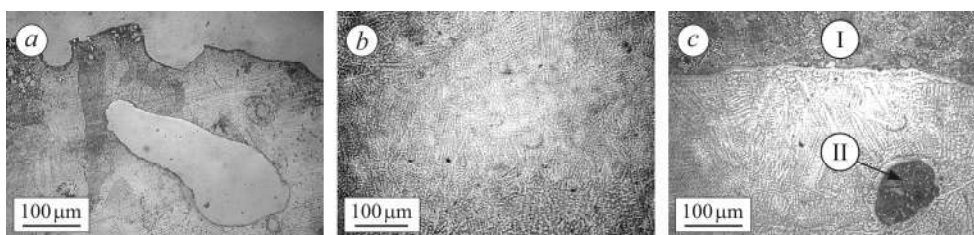
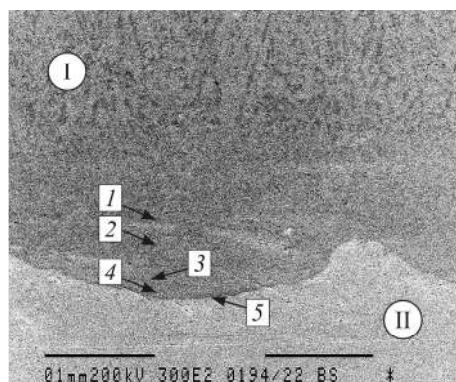


Рис. 5. Мікроструктура зони сплавлення (а), центральної частини (b) та прошарку (I) і включення (II) міді (с) у металі, наплавленому плазмовим способом порошком ПН-АН34 на основі кобальту.  $\times 100$ .

Fig. 5. Microstructure of the fusion zone (a), the central part (b) and the interlayer (I) and inclusion (II) of copper (c) in the metal deposited by the plasma method with cobalt-based PH-AN34 powder.  $\times 100$ .

Аналогічно з наплавленим металом на основі нікелю дослідили наплавлений метал на основі кобальту (рис. 6). Як бачимо, вміст міді у такому металі не перевищує 5 mass% на відстані 5  $\mu\text{m}$  від лінії сплавлення (4). Наплавлений метал за хімічним складом практично відповідає порошку ПН-АН34.



Елементи	mass%			
	1	2	3	4
Si	0,83	0,66	0,63	0,38
Cr	24,52	29,97	33,42	32,54
Fe	2,38	1,63	2,35	2,15
Co	57,68	58,02	50,29	49,85
Ni	5,48	3,15	4,38	4,53
Cu	2,92	2,0	3,49	4,95
W	6,18	4,57	5,44	5,6

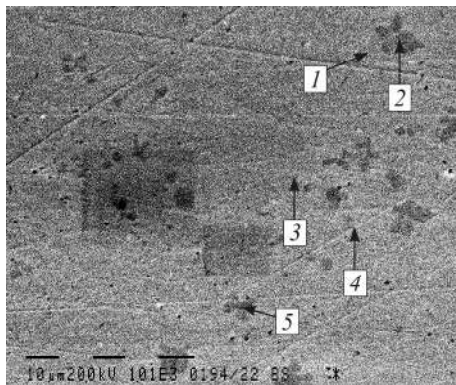
Рис. 6. Мікроструктура зони сплавлення зразка, наплавленого плазмовим способом порошком ПН-АН34 на основі кобальту, з локальним хімічним аналізом: 1 – основа сплаву  $\approx 50 \mu\text{m}$  від лінії сплавлення; 2 –  $\approx 30 \mu\text{m}$ ; 3 –  $\approx 10 \mu\text{m}$ ; 4 –  $\approx 5 \mu\text{m}$ ; 5 – лінія сплавлення. I – кобальтовий сплав; II – мідь.  $\times 300$ .

Fig. 6. Microstructure of the fusion zone of the sample, deposited by the plasma method with PH-AN34 powder based on cobalt with local chemical analysis: 1 – alloy base  $\approx 50 \mu\text{m}$  from the fusion line; 2 –  $\approx 30 \mu\text{m}$ ; 3 –  $\approx 10 \mu\text{m}$ ; 4 –  $\approx 5 \mu\text{m}$ ; 5 – fusion line. I – cobalt alloy; II – copper.  $\times 300$ .

На рис. 7 наведено результати дослідження мідного включення у металі, наплавленому плазмовим способом порошком ПН-АН34 на основі кобальту.

Як і слід очікувати, основою таких включень є мідь (1, 3, 4). Водночас у мідних включеннях спостерігаємо темні включення, основою яких є кобальт, а вміст міді в них не перевищує 10 mass% (2, 5).

Таким чином, хоча використання порошку ПН-АН34 за плазмового наплавлення на мідь забезпечує хороше формування наплавленого металу, її включення та прошарки в наплавленому металі не дозволяють рекомендувати цей порошок для зносостійких мідних деталей.



Елементи	mass%				
	1	2	3	4	5
Si	0,11	0,97	0,17	0,22	1,13
Cr	0,56	21,41	0,72	0,68	22,52
Fe	0,28	2,78	0,34	0,2	2,7
Co	2,09	58,76	2,02	2,07	58,67
Ni	1,64	5,21	1,4	1,57	5,49
Cu	93,61	9,75	93,23	93,33	9,49
W	1,69	1,12	2,12	1,94	–

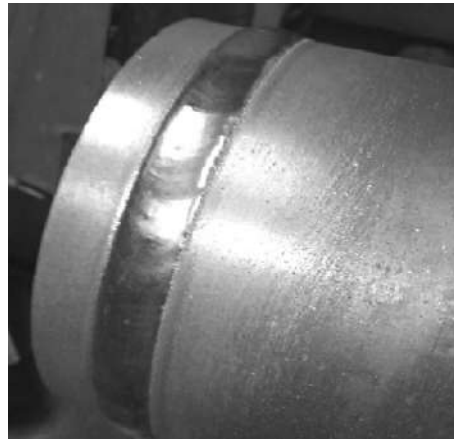
Рис. 7. Мікроструктура мідного включення у металі, наплавленому плазмовим способом порошком ПН-АН34 на основі кобальту, з локальним хімічним аналізом:  
1, 3, 4 – основа; 2, 5 – включення.  $\times 1000$ .

Fig. 7. Microstructure of the copper inclusion in a metal, deposited by plasma method with ПН-АН34 cobalt-based powder with local chemical analysis:  
1, 3, 4 – base; 2, 5 – inclusion.  $\times 1000$ .

На підставі досліджень розробили технологію плазмового наплавлення циліндричних мідних зразків  $\varnothing 150$  mm з товщиною стінки 8 mm (рис. 8) порошком ПГ-СР4 на основі нікелю. Режим наплавлення: струм 200...220 А; швидкість наплавлення 7 m/h; подача порошку 2,5 kg/h; витрата плазмоутворювального газу 1,5 l/min; витрата транспортного газу 8 l/min; витрата захисного газу 12...15 l/min; відстань від плазмотрона до виробу  $h = 8...10$  mm; амплітуда й частота коливань плазмотрона  $a = 8$  mm,  $f = 60$  min<sup>-1</sup>, відповідно. Зсув зі zenіту 5...7 mm. Для запобігання утворенню тріщин використовували попередній підігрів зразка до 300°C. Обертали зразок у напрямку оператора, що дало можливість контролювати формування наплавлених валиків.

Рис. 8. Зовнішній вигляд валика, наплавленого плазмовим методом порошком ПГ-СР4 на основі нікелю на циліндричний мідний зразок.

Fig. 8. Appearance of a roller, deposited by the plasma method ПГ-СР4 powder based on nickel on a cylindrical copper sample.



Як бачимо, розроблені технологічні режими плазмового наплавлення на мідну основу порошком на основі нікелю забезпечують відмінне формування наплавленого металу.

### ВИСНОВКИ

За результатами експериментів з плазмового наплавлення порошками ПГ-СР4 та ПН-АН34 на мідь М1 підібрані технологічні режими, які забезпечують задовільне формування наплавленого металу та його сплавлення з основним металом.

Найкращі результати показав порошок ПГ-СР4 на основі нікелю. При застосуванні кобальтового порошку ПН-АН34 виявили окремі дефекти в наплавленому металі у вигляді прошарків та окремих включень міді, тому не можемо його рекомендувати для наплавлення зносостійких мідних деталей.

1. *Тылкин М. А.* Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. – М.: Металлургия, 1971. – 608 с.
2. *Рябцев И. А., Сенченков И. А., Турык Э. В.* Наплавка. Материалы, технологии, математическое моделирование. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Slaskiej, 2015. – 590 с.
3. *Гуревич С. М.* Справочник по сварке цветных металлов. – К.: Наук. думка, 1990. – 512 с.
4. *Problems and prospects of surfacing of copper and copper parts by wear-resistant layers (Review)/ A. A. Babinets, I. O. Ryabtsev, I. P. Lentugov, I. I. Ryabtsev, Yu. V. Demchenko, abd A. I. Panfilov // The Paton Welding J. – 2020. – № 5. – С. 15–23. <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.05.03>*
5. *Lide D. R. and Haynes W.* CRC Handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data. – Boca Raton: Taylor & Francis, 2018. – 2666 p.
6. *Гладкий П. В, Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А.* Плазменная наплавка. – К.: Экотехнология, 2007. – 292 с.
7. *Elevation of the wear resistance of low-alloy structural steel by plasma-powder surfacing with alloys based on iron, chromium, and nickel / E. F. Perepl'otchikov, Kh. B. Vasylyiv, V. A. Vynar, I. O. Ryabtsev, and V. I. Zakiev // Materials Science. – 2018. – 54, № 3. – P. 378–386.*
8. *Dilution control of weld overlay superalloys using Taguchi method / C. C. Silva, de E. C. Miranda, M. F. Motta, de H. C. Miranda, and J. P. Farias // Proc. of the ASME 31<sup>st</sup> Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng. – 2012. – № 6. – С. 289–299.*
9. *Messler W. Robert jr.* A Practical Guide to Welding Solutions: Overcoming Technical and Material-Specific Issues. – Wiley-VCH, 2019. – 344 p. DOI:10.1002/9783527818815
10. *Massalski T. B.* Binary alloy phase diagrams. – Ohio: Materials Park, ASM International, 2007. – 3589 p.

Одержано 17.06.2022