

ЕЛЕКТРОДУГОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА ТА НІКЕЛЮ НА МІДЬ

І.О. Рябцев¹, А.А. Бабінець¹, І.П. Лентюгов¹, І.Л. Богайчук¹, А.І. Панфілов²

¹ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ТОВ «Стіл Ворк». 50000, м. Кривий Ріг, просп. Миру, 50

Представлені результати досліджень формування зварного з'єднання при електродуговому наплавленні на мідь дротами, що забезпечують отримання наплавленого металу на основі заліза та нікелю, які за даними авторів та за публікаціями в технічній літературі мають високу стійкість при різних видах зношування при підвищених температурах. Підібрані режими та розроблено технології дугового наплавлення обраними дротами на мідну основу, які забезпечують задовільне формування наплавленого металу та його сплавлення з основним металом. Експерименти з електродуговим наплавленням на мідь і дослідження макро- і мікроструктури наплавлених зразків показали, що найкращі результати з точки зору зварювально-технологічних властивостей забезпечує використання дроту на основі нікелю. Допустимість окремих дефектів, які були виявлені у наплавленому металі та на лінії сплавлення основного та наплавленого металу при дослідженнях, буде визначатися умовами експлуатації конкретних деталей. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: наплавлення на мідь, зносостійкі сплави, електродугове наплавлення, мідь, зварюваність, зона сплавлення

Вступ. Мідь, яка має високу електро- і теплопровідність, пластичність та корозійну стійкість, широко використовується в різних галузях промисловості при виготовленні кристалізаторів, фурм, теплообмінників, трубопроводів, деталей хімічної апаратури, кабельної і електроконтактної продукції та ін. [1].

У той же час низька зносостійкість і жаростійкість міді призводить до того, що деякі мідні деталі, зокрема, кристалізатори, фурми та інші деталі, які експлуатуються в умовах контакту з розплавленим металом, високотемпературними газовими потоками і абразивами різної твердості, швидко виходять з ладу і вимагають заміни.

Одним з можливих шляхів підвищення експлуатаційних властивостей мідних деталей може бути наплавлення на їх поверхні, що зношуються, шарів з високими зносостійкими властивостями.

Однак при наплавленні на мідь зносостійких сплавів різних систем легування, зокрема, на основі заліза та нікелю, виникають великі складнощі, пов'язані з тим, що останні мають більш високу температуру плавлення і значно менші електро- та теплопровідність, а також коефіцієнт термічного розширення (КТР), ніж мідь (таблиця).

Зазначені вище відмінності в теплофізичних властивостях можуть вплинути на зварюваність сплавів на основі заліза та нікелю з міддю:

– висока теплопровідність міді призводить до високих швидкостей охолодження та необхідності застосування джерел зварювального нагріву з великою погонною енергією або використання попе-

реднього та супутнього підігріву мідних деталей, а іноді й того й іншого;

– відносно низька температура плавлення міді, що при дуговому наплавленні на мідь сплавів на основі заліза та нікелю може призводити до значного проплавлення мідної основи;

– невеликий час існування зварювальної ванни в рідкому стані через високу теплопровідність міді обмежує можливості її металургійної обробки та вимагає використання активних розкислювачів;

– великий КТР міді, що при наплавленні зносостійких сталей і сплавів на деталі з міді може призвести до високих залишкових напружень та великих деформацій;

– велика рідкоплинність міді, яка в деяких випадках може погіршити формування наплавленого металу;

– легка окиснюваність міді у розплавленому стані, що призводить до утворення легкоплавких евтектик, які знижують стійкість міді проти утворення кристалізаційних тріщин [3].

З цих проблем, які виникають при наплавленні зносостійких сплавів на основі заліза та нікелю на

Теплофізичні властивості міді, заліза та нікелю [2]

Показник	Мідь	Залізо	Нікель
Атомна маса	63,54	55,85	58,69
Температура плавлення, °С	1083	1535	1453
КТР на 1 °С, 10 ⁻⁶	17,06	12,15	13,6
Теплопровідність, Вт/(м·К)	413	94	107
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	385	449	500
Питомий опір, Ом·м, ·10 ⁻⁸	1,68	10,0	6,99
Щільність, кг/м ³	8930	7850	8900

Рябцев І.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>, Бабінець А.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4432-8879>,

Лентюгов І.П. – <https://orcid.org/0000-0001-8474-6819>,

© І.О. Рябцев, А.А. Бабінець, І.П. Лентюгов, І.Л. Богайчук, А.І. Панфілов, 2022

мідь, основними є нижча температура плавлення міді та її більш висока теплопровідність (див. таблицю). В результаті при наплавленні на мідь зварювальна ванна швидко втрачає тепло, що призводить до різкого зниження її рідкоплинності і, як наслідок, до поганого формування наплавлених валиків або навіть до відсутності їх формування та сплавлення з основним металом.

Крім того, внаслідок високої швидкості кристалізації зварювальної ванни в наплавленому металі можуть виникати включення міді, які можуть знижувати його експлуатаційні властивості [3].

Мета досліджень: з урахуванням викладеного вище та наявного практичного досвіду, розробити технології електродугового наплавлення на мідну основу шарів на основі заліза та нікелю, які мають високі зносостійкі властивості при різних видах зношування при підвищених температурах.

Матеріали та методи проведення експериментів з електродугового наплавлення на мідну основу. Були проведені експерименти з електродугового наплавлення на мідну основу дротами, що забезпечують отримання наплавленого металу на основі заліза або нікелю, які мають високі зносостійкі властивості при підвищених температурах [4].

Дроти цих типів були обрані для досліджень, виходячи з наступних міркувань та з урахуванням вимог до згаданих вище службових властивостей мідних деталей [4–6]:

- напівтеплостійкі та теплостійкі сталі, комплексно леговані хромом, молібденом, нікелем і т. д.;
- високохромисті чавуни (сплави типу сормайт);
- сплави на нікелевій основі.

Порошкові дроти, що забезпечують одержання наплавленого металу типу напівтеплостійких та теплостійких сталей системи легування Fe–C–Cr–Mo–V широко використовуються для зміцнення деталей металургійного устаткування, які працюють в умовах циклічних теплових, високих динамічних навантажень у комбінації з тертям металу по металу без або з абразивним прошарком. Сталі з високим вмістом вольфраму мають найбільшу твердість і теплостійкість при високих температурах, однак термічна стійкість і ударна в'язкість таких сталей порівняно невисока [4]. Заміна вольфраму молібденом (повна або часткова) знижує теплостійкість сталі, однак суттєво підвищує її термічну стійкість. Сталі даного класу при наплавленні схильні до утворення тріщин, тому наплавлення ведуть із попереднім, а іноді із супутнім підігрівом. Далі за текстом статті порошок дріт цього типу, який використовувався при проведенні досліджень, для стислості називається дріт № 1.

Порошкові дроти або стрічки, що забезпечують одержання наплавленого металу типу високохро-

мистого чавуни із вмістом вуглецю та хрому до 5 та 30 %, відповідно, використовуються для наплавлення деталей, які працюють в умовах інтенсивного абразивного або газоабразивного зношування при високих температурах (до 1000 °С). Для наплавлення цими матеріалами можна використовувати різні способи, однак технологія наплавлення пов'язана зі значними складнощами через їх високу схильність до утворення тріщин [4]. Порошковий дріт цього типу далі для стислості називається дріт № 2.

Дроти, що забезпечують одержання наплавленого металу на нікелевій основі мають високу жароміцність, гарну стійкість проти термічної втоми, високу стійкість проти різних видів корозії та мало схильні до утворення тріщин при наплавленні. Одними з найпоширеніших марок сплавів цього типу є сплави Інконель систем легування типу Ni–Cr–Mo–Nb [4]. За даними численних досліджень [5–8 та ін.], застосування матеріалів на основі нікелю дозволяє одержати метал із кращими показниками по зварюваності, корозійній стійкості та зносостійкості. Порошковий дріт цього типу далі для стислості називається дріт № 3.

З використанням дротів, які забезпечують одержання наплавленого металу вказаних вище типів, були проведені експерименти з відпрацювання технології та техніки дугового наплавлення на плоскі заготовки з міді М1 розмірами (8...10)×100×100 мм.

Задовільні результати з електродугового наплавлення на мідні пластини порошковим дротом № 1 діаметром 1,6 мм під флюсом АН-26П, який забезпечує отримання наплавленого металу типу напівтеплостійкої інструментальної сталі 25Х5ФМС, були досягнуті на наступних режимах: струм – 280...300 А; напруга – 28...30 В; швидкість наплавлення – 15 м/год; перекриття валиків – 15...20 %. Однак при зовнішньому огляді було зазначено, що при наплавленні на вказаних режимах валики виходять дуже вузькими. Підвищення напруги до 32 В значно покращило формування наплавлених валиків.

При дуговому наплавленні на мідну пластину самозахисним порошковим дротом № 2 діаметром 1,6 мм, який забезпечує отримання наплавленого металу типу високохромистого чавуни 400Х25ГСМ, був підібраний наступний режим, при якому процес наплавлення проходив задовільно, а формування наплавлених валиків було досить хорошим: струм – 200...250 А, напруга – 24...26 В, швидкість наплавлення – 12...18 м/год; перекриття валиків – 45...50%.

Були проведені експерименти з дугового наплавлення на мідь у інертному газі суцільним дротом № 3 діаметром 1,6 мм, який забезпечує



Рис. 1. Зовнішній вигляд валиків, наплавлених на зразок з міді М1 порошковим дротом № 1 (тип наплавленого металу 25Х5ФМС) (а) та макрощліф їх поперечного перерізу (б)



Рис. 2. Мікроструктура (×200) міді, яка використовувалась у якості основного металу

отримання наплавленого металу типу Inconel Н65Х25М11В4. Наплавлення виконували одиничними валиками без і з перекриттям валиків на 40...50 %. Режим наплавлення, що забезпечує хороше формування наплавлених валиків: струм – 190 ... 200 А; напруга – 25...26 В; швидкість наплавлення – 15 ...18 м/год; витрата захисного газу – 15 л/хв.

При відпрацюванні технології наплавлення трьома дротами для запобігання утворенню тріщин у наплавлених валиках застосовували попередній підігрів зразків, що наплавляються.

Результати експериментів та їх обговорення. Зовнішній вигляд валиків, наплавлених на мідну пластину порошковим дротом № 1 на вказаних вище режимах, наведено на рис. 1 а, а макрощліф їх поперечного перерізу – на рис. 1, б. Спостерігається досить якісне сплавлення сталі 25Х5ФМС з мідною основою, хоч і відзначено наявність невеликих несплавлень, розташованих по лінії сплавлення. Твердість наплавленого металу *HRC* 46...50.

Досліджували мікроструктуру зразка, наплавленого порошковим дротом № 1. Мідна основа поблизу лінії сплавлення має крупнозернисту структуру (рис. 2), твердість мідної основи *HV1* – 822 МПа. Лінія сплавлення в зразку має хвилясту форму (рис. 3, а), по границі виявлені ділянки несплавлення основного й наплавленого металів (рис. 3, б) і одиничні пори діаметром 70...150 мкм (рис. 3, в). Твердість основного металу (мідь) на відстані \approx 150 мкм від лінії

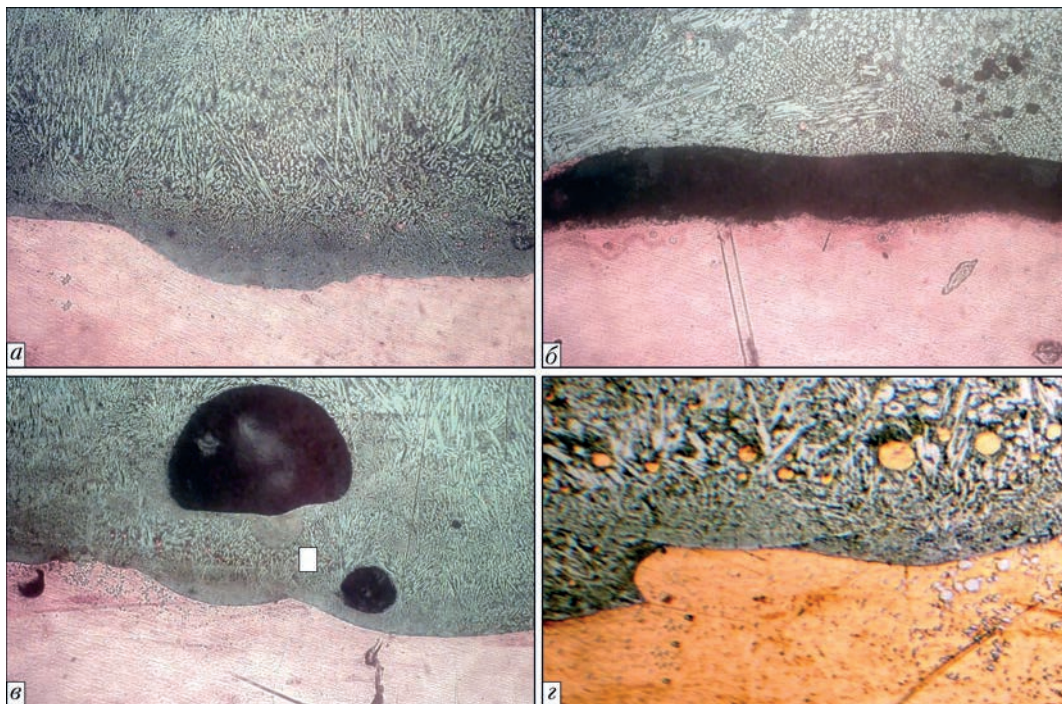


Рис. 3. Мікроструктура зони сплавлення зразка, який наплавлено порошковим дротом № 1 (тип наплавленого металу 25Х5ФМС): а – у зоні сплавлення; б – ділянка несплавлення; в – пори у зоні сплавлення; г – зона взаємної дифузії сталь–мідь. а–в – ×200; г – ×320

сплавлення перебуває на рівні основного металу $HV1 - 840$ МПа, а поблизу лінії сплавлення становить $HV1 - 1050$ МПа, що викликане дифузійними процесами на межі сталь-мідь.

У наплавленому металі вздовж лінії сплавлення на відстані $30 \dots 80$ мкм розташовується область із дисперсною структурою, яка має твердість $HV1 - 5420$ МПа. У прилягаючих до неї об'ємах металу відбувається виділення карбідів у вигляді пластин і голок з більш високою твердістю – $HV1 - 6130$ МПа. У цій області виявлені також дрібні вclusions міді глобулярної форми (рис. 3, з).

У центральній частині наплавленого металу відбувається значне укрупнення структури (рис. 4). У твердому розчині на основі заліза виділяються карбіди різної морфології – шестигранної, пластинчастої й ланцетоподібної форми, що мають максимальний розмір 150 мкм і твердість $HV1 - 10180 \dots 11870$ МПа, а також евтектичні утворення із твердістю $HV1 - 6810 \dots 7240$ МПа.

У наплавленому металі також присутні вclusions міді глобулярної форми, із твердістю $HV1 - 1030 \dots 2540$ МПа (рис. 4). У безпосередній близькості від цих вclusions твердість наплавленого металу знижена ($HV1 - 6060$ МПа) у порівнянні з твердістю матриці $HV1 - 6810 \dots 7240$ МПа.

Зовнішній вигляд мідного зразка, наплавленого дротом № 2, наведено на рис. 5 а, а макрошліф його поперечного перерізу – на рис. 5, б. Спостерігається досить якісне сплавлення наплавленого металу типу високохромистого чавуну з мідною основою, хоч і відзначено наявність поодиноких дрібних пор, розташованих біля лінії сплавлення. Твердість наплавленого металу $HRC 56 \dots 60$.

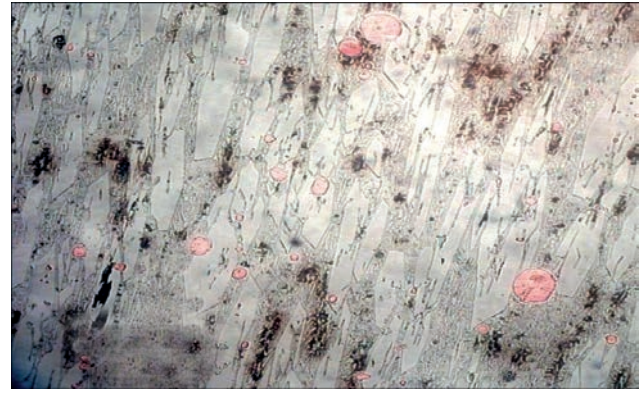


Рис. 4. Мікроструктура ($\times 200$) центральної частини металу, наплавленого порошковим дротом № 1 (тип наплавленого металу 25X5ФМС)

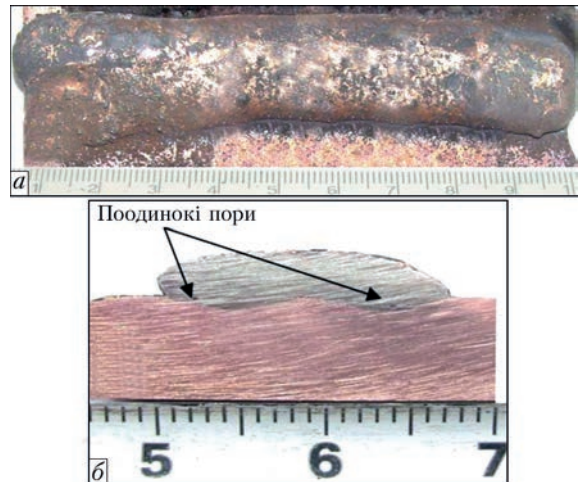


Рис. 5. Зовнішній вигляд валиків, наплавлених на зразок із міді М1 самозахисним порошковим дротом № 2 (тип наплавленого металу 400X25ГСМ) (а) та макрошліф їх поперечного перерізу (б)

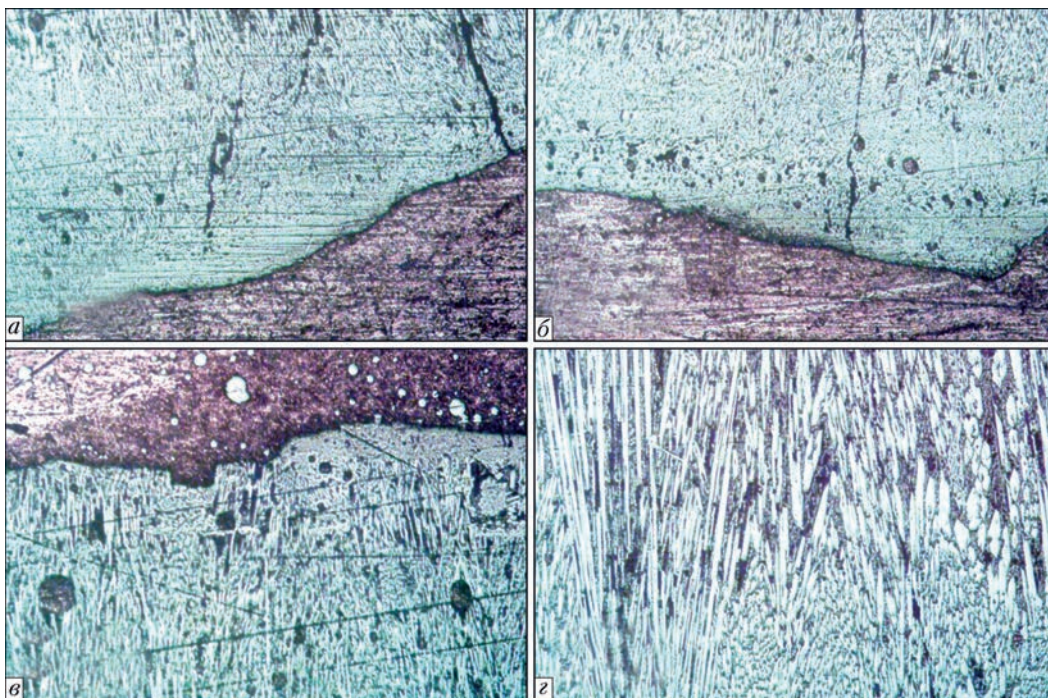


Рис. 6. Мікроструктура ($\times 100$) металу, наплавленого електродуговим методом самозахисним дротом № 2 (тип наплавленого металу 400X25ГСМ): а, б – лінія сплавлення; в – верхній край наплавленого шару з прошарком міді; г – центр наплавленого шару

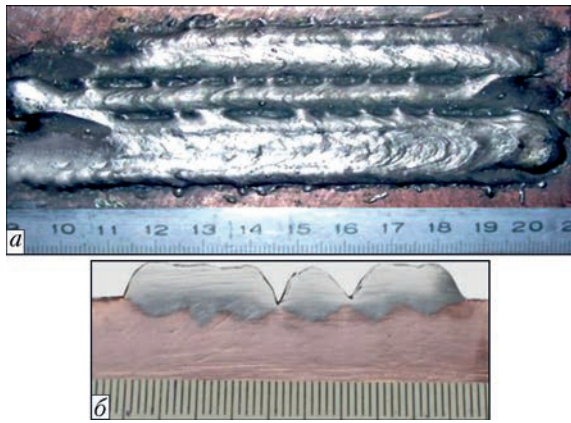


Рис. 7. Зовнішній вигляд валиків, наплавлених на зразок з міді М1 суцільним дротом № 3 (тип наплавленого металу Н65Х25М11Б4) (а) та макрошліф їх поперечного перерізу (б)

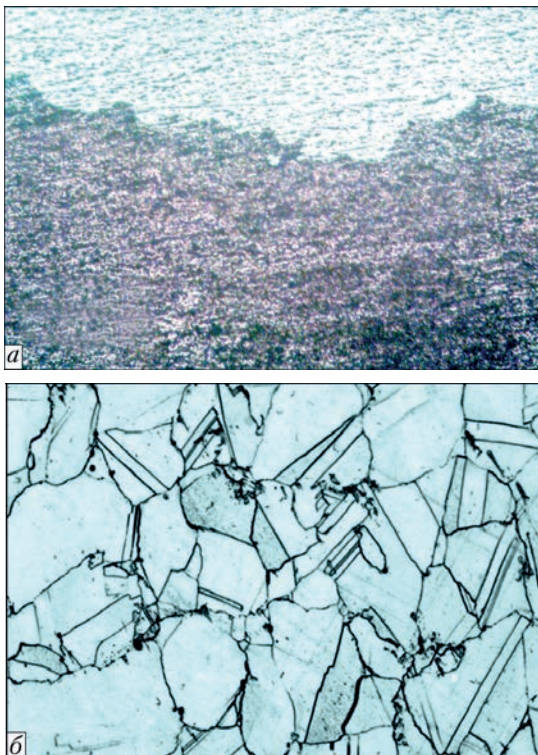


Рис. 8. Мікроструктура металу, наплавленого дротом № 3 (тип наплавленого металу Н65Х25М11Б4): а – лінія сплавлення; б – центральна частина металу наплавленого шару. $\times 100$ (а), $\times 320$ (б)

Дослідження мікроструктури зразка, наплавленого дротом № 2, показало, що лінія сплавлення у ньому досить чітко виражена, при цьому в наплавленому шарі є тріщини, деякі з яких виходять на поверхню (рис. 6, а, б). Тріщини такого типу, характерні для наплавленого металу типу високохромистих чавунів і, наприклад, при наплавленні зносостійких біметалевих листів, не є ознакою бракування [4].

У даному зразку відзначена також наявність прошарку литої міді у верхній частині наплавленого шару з вкрапленнями зносостійкого металу (рис. 6, в). Кристалізація наплавленого металу має спрямований характер (рис. 6, г).

Зовнішній вигляд зразка, наплавленого дротом № 3, наведено на рис. 7 а, а макрошліф його поперечного перерізу – на рис. 7, б. Слід зазначити хороше формування наплавлених валиків та якісне сплавлення наплавленого металу на основі нікелю з міддю, без дефектів у наплавленому металі та на межі сплавлення. Твердість наплавленого металу НВ 245.

Мікроструктура зони сплавлення та центральної частини металу, наплавленого дротом № 3, наведена на рис. 8, а, б.

Дослідження мікроструктури цього зразка показало відсутність дефектів як в наплавленому металі, так і біля лінії сплавлення. Встановлено, що структура наплавленого металу досить однорідна. Характер лінії сплавлення основного й наплавленого металу має яскраво виражену хвилястість, що добре помітно при великих збільшеннях (рис. 8, а).

Мікроструктура в центрі наплавленого шару досить однорідна, у ній відсутні дефекти у вигляді пор, включень, тріщин і т.д. (рис. 8, б). Вона являє собою твердий розчин хрому, молібдену, ніобію й інших легуючих елементів у нікелі й має вигляд досить рівномірної суміші великих і дрібних зерен, пересічених двійниковими границями (рис. 8, б). Середній розмір зерна перебуває в межах 30...50 мкм.

Висновки

1. За результатами експериментів з електродугового наплавлення трьома дротами, що забезпечують отримання зносостійкого наплавленого металу на основі заліза та нікелю, на мідь М1 підібрані режими та розроблено технології дугового наплавлення цими дротами, які забезпечують задовільне формування наплавленого металу та його сплавлення з основним металом. При цьому з точки зору зварювально-технологічних властивостей найкращі результати забезпечує використання дроту на основі нікелю.

2. При використанні порошкових дротів, що забезпечують отримання наплавленого металу на основі заліза (напівтеплостійка сталь та високохромистий чавун), виявлено окремі дефекти в наплавленому металі та на лінії сплавлення, допустимість яких визначатиметься умовами експлуатації конкретних деталей. Останнє відноситься також до дроту на основі нікелю.

Список літератури/References

- Gurevich, S.M. (1990) *Spravochnik po svarke cvetnyh metallov* [Non-ferrous metal welding guide]. Kiev, Naukova dumka, [in Russian].
- Lide, D.R., Haynes, W. (2018) *CRC Handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data*. Boca Raton, Taylor and Francis.
- Babinets, A.A., Ryabtsev, I.O., Lentugov, I.P. et al. (2020) Problems and prospects of surfacing of copper and copper

- parts by wear-resistant layers (Review). *The Paton Welding J.*, **5**, 15–23. <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.05.03>
4. Rjabcev, I.A., Senchenkov, I.K., Turyk, Je.V. (2015) *Naplavka. Materialy, tehnologii, matematicheskoe modelirovanie* [Surfacing. Materials, technologies, mathematical modeling]. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Slaskiej, [in Russian].
 5. Pereplyotchikov, E.F. (2004) Plasma-powder cladding of wear- and corrosion-resistant alloys in valve manufacturing. *The Paton Welding Journal*, **10**, 31–37.
 6. Pereplyotchikov E.F. (2015) Plasma-powder surfacing of nickel and cobalt alloys on copper and its alloys. *The Paton Welding Journal*, **5-6**, 10–13. DOI:10.15407/tpwj2015.06.02
 7. Silva, C.C., de Miranda, E.C., Motta, M.F. et al. (2012) Dilution control of weld overlay superalloys using Taguchi method. *Proc. of the ASME 31st int. conf. on ocean, offshore and arctic engineering*, **6**, 289–299.
 8. Robert, W. Messler (2019) *A Practical Guide to Welding Solutions: Overcoming Technical and Material-Specific Issues*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527818815>

ELECTRIC ARC SURFACING OF WEAR-RESISTANT IRON- AND NICKEL-BASED ALLOYS ON COPPER

I.O. Ryabtsev¹, A.A. Babinets¹, I.P. Lentuygov¹, I.L. Bogaychuk¹, A.I. Panfilov²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²OJSC «Steel Work», 50 Myru Ave., 50000, Kryvyi Rih, Ukraine.

The results of studying the formation of welded joint in electric arc surfacing on copper by the wires, providing a deposited metal based on iron and nickel, which according to the authors and publications in the technical literature have a high resistance to different types of wear at elevated temperatures. The modes were selected and technologies of arc surfacing on a copper basis by selected wires were developed, which provide a satisfactory formation of the deposited metal and its fusion with the base metal. According to the results of experiments on electric arc surfacing on copper, as well as the study of macro- and microstructure of deposited specimens, it was shown that the best results in terms of welding and technological properties are provided by the use of nickel-based wire. The permissibility of individual defects that were found in the deposited metal and on the fusion line of the base and deposited metal during studies will be determined by the operating conditions of specific parts. 8 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Keywords: surfacing on copper, wear-resistant alloys, electric arc surfacing, copper, weldability, fusion zone

Надійшла до редакції 19.04.2022

XXI МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2022

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

15 - 18
листопада

МЕТАЛОБРОБКА
 УКРЗВАРЮВАННЯ
 ПІДШИПНИКИ
 ПІДШИПНИКИ
 УКРВТОРТЕХ
 УКРИТВО
 АВТОМАТИЗАЦІЯ
І РОБОТЕХНІКА
 ЗРАЗКИ, СТАНДАРТИ
ЕТАЛОНИ, ПРИЛАДИ
 ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНЕ
СКЛАДСЬКЕ ОБЛАДНАННЯ
 БЕЗПЕКА
ВИРОБНИЦТВА

Генеральний інформаційний партнер:

Ексклюзивний медіа партнер:

**МІЖНАРОДНИЙ
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**

м. Київ, Броварський пр-т, 15
станція метро «Лівобережна»

+38 (044) 201-11-65, (56)

plast@iec-expo.com.ua

www.iec-expo.com.ua