

УДК 621.791.36:669.35

С.В. Максимова, д-р техн. наук, проф., завідувач відділу;
e-mail: maksymova.svitlana15@ukr.net; ORCID: 0000-0003-0158-5760;

А.М. Писарєв, наук. співроб.; ORCID: 0000-0002-6615-6847

В.В. Воронов, канд. техн. наук, старш. дослідник, старш. наук. співроб.;
e-mail: vorona76@ukr.net; ORCID: 0000-0002-0410-1154

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (Київ, Україна)

ВПЛИВ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ Й МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Cu–Zn–(Me)

У сучасному машинобудуванні затребувані припої на основі міді з температурою плавлення 600–650 °С, що мають достатній рівень характеристик міцності та пластичності. У роботі представлені результати досліджень щодо оцінки впливу легуючих елементів на технологічні та механічні властивості сплавів системи Cu–P–(Zn, Ni). За допомогою проведених досліджень високотемпературного диференційного термічного аналізу, механічних випробувань та з використанням статистичної обробки результатів отримано рівняння регресії, які описують залежності температури ліквідусу та солідусу, а також межі міцності та відносного видовження сплавів від вмісту цинку й фосфору. На базі результатів металографічних досліджень сплавів системи Cu–P–(Zn, Ni) визначено вплив фосфору, цинку і нікелю на об'ємну частку твердого розчину. Зокрема, встановлено, що легування сплавів бінарної системи Cu–P цинком до 25 мас. % призводить до зростання в них частки твердого розчину з 42–45 до 65–69 об. %. Додаткове збільшення кількості твердого розчину в сплаві (до 72–75 об. %) досягається шляхом легування сплаву системи Cu–P–Zn нікелем (до мас. 5 %), що дозволяє отримувати сплав із межею міцності на рівні 450...500 МПа зі збереженням пластичних характеристик ($\delta = 6\%$). Слід зазначити, що легування 5 мас. % нікелю при вмісті цинку 25 мас. % дозволяє підтримувати відмінне від нуля відносне видовження при вмісті фосфору 5,5...6 мас. %. Таке легування сплавів системи Cu–P–(Zn, Ni) забезпечує температуру плавлення в межах 650–750 °С при меншій концентрації фосфору і, як наслідок, доволі високому рівні пластичних властивостей (до 6...8 %). За результатами проведених досліджень визначено склад сплаву системи Cu–P–(Zn, Ni), який потенційно може бути використаний як припой для паяння міді та мідних сплавів.

Ключові слова: мідно-фосфорні сплави; припій; паяння; фосфор; цинк; нікель; механічні властивості.

Вступ

Високотемпературне паяння широко використовується при виготовленні конструкцій зі сталей та кольорових металів, сплавів спеціального призначення, кераміки.

Сьогодні дуже популярним є паяння з використанням припоїв на основі срібла з температурою плавлення 600...750 °С. Альтернативою дорогим срібло- та золотовмісним припоєм у даному випадку є припої на основі міді й нікелю, у яких як депресанти можуть бути застосовані цинк, кремній, олово, фосфор та ін. [1–5].

Особливістю припоїв системи Cu–Zn є вища температура плавлення, порівняно з припоєми на основі Cu–Ag (близько 800 °С). Підвищення вмісту цинку сприяє збільшенню міцності припоїв до 350 МПа, при цьому пластичність припоїв знижується [6, 7].

Ще однією особливістю мідно-цинкових припоїв є інтенсивне випаровування цинку через близькість температури його паяння до температури кипіння ($T = 906^\circ\text{C}$). Це призводить до утворення пор у паяному шві та підвищення температури солідусу й ліквідусу припоїв [6, 7]. Для забезпечення необхідного інтервалу плавлення припоїв в межах $650\ldots 750^\circ\text{C}$ і, таким чином, запобігання випаровуванню цинку в процесі паяння сплав необхідно додатково легувати депресантами, наприклад, фосфором [8].

Відомо, що однією з головних небезпек при паянні низьковуглецевих і корозій-нотривких сталей мідно-фосфорними припоями є крихкість паяних з'єднань, спричинена утворенням суцільних прошарків фосфідів заліза на границі паяного шва з металом, що паяється [7, 8].

У той же час у літературі недостатньо даних про вплив елементів, що мають більшу хімічну спорідненість із фосфором порівняно із залізом. Очікується, що за умови легування припою такими елементами відбуватиметься утворення твердих розчинів, які виділятимуться в контактних зонах і пригнічуватимуть утворення прошарків чистого фосфіду заліза, підвищуючи пластичні характеристики паяних з'єднань [7–10].

Мета даної роботи — на підставі аналізу літературних даних, діаграм стану металевих систем та експериментальних досліджень визначити вплив легуючих елементів на технологічні властивості припоїв системи Cu-Zn-P-Ni , що характеризуються температурним інтервалом плавлення в межах $650\ldots 750^\circ\text{C}$.

Матеріали та методи досліджень

Як шихтові матеріали для виплавки експериментальних сплавів системи Cu-Zn-P-Ni використовували латунь Л63, мідно-фосфорний сплав МФ1, нікель катодний марки Н1. Сплави виплавляли із застосуванням індукційного нагріву в графітовому тиглі з подальшим виливанням у кокіль. Склад отриманих сплавів системи $\text{Cu-(10\ldots 30)Zn-(3\ldots 6)P-(3\ldots 6)Ni}$ контролювали за допомогою хімічного аналізу.

Для визначення фазового складу сплавів застосовували рентгеноструктурний аналіз. Температурний інтервал плавлення (температуру солідусу й ліквідусу) досліджували із застосуванням високотемпературного диференційного термічного аналізу на установці ВДТА-8.

Із метою визначення оптимального складу припою та скорочення кількості експериментів при виборі конкретного хімічного складу, що відповідає поставленим вимогам та заданому температурному інтервалу плавлення, проводили математичну обробку експериментальних даних із застосуванням статистичних методів аналізу. Незалежними змінними обрано концентрації легуючих елементів припою (Cu , Zn , P), а залежними — температуру плавлення (T_L), міцність (σ_B) та відносне видовження (δ).

Об'ємну частку фаз успавах визначали з використанням спеціалізованого програмного комплексу ImageJ Pro.

Обговорення результатів

З аналізу потрійних діаграм (рис. 1, а, б, в) Cu-Ni-P [11], Cu-Zn-P [12], та Cu-Zn-Ni [13, 14] випливає, що введення нікелю в сплав Cu-P розширює область α -твердого розчину. При вмісті фосфору більше 4 % мас. утворюється потрійна евтектика $(\text{Cu})+\text{Cu}_3\text{P}+\text{Cu}_2\text{NiP}$ [9].

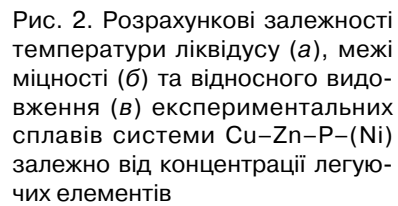
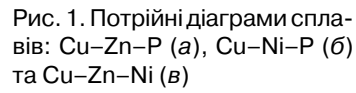
У результаті математичної обробки даних високотемпературного термічного аналізу експериментальних сплавів системи Cu-Zn-P-(Ni) із різним вмістом легуючих компонентів та їх механічних характеристик отримано залежності температури ліквідусу (рис. 2, а), межі міцності (рис. 2, б) та відносного подовження (рис. 2, в) від концентрації легуючих елементів:

$$T_L = 804,139 + 0,7051 \cdot x + 69,1019 \cdot y - 0,001 \cdot x^2 \dots - 1,4621 \cdot x \cdot y - 7,7502 \cdot y^2 \quad (1)$$

$$\sigma_B = 17,1518 + 1,3035 \cdot x - 0,2601 \cdot y - 0,0177 \cdot x^2 + 0,0947 \cdot x \cdot y + 0,307 \cdot y^2 \quad (2)$$

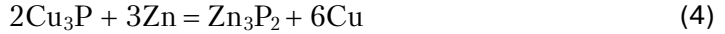
$$\delta = 38,399 + 0,7636 \cdot x - 17,2355 \cdot y - 0,0346 \cdot x^2 + 0,2587 \cdot x \cdot y + 0,796 \cdot y^2 \quad (3)$$

де x — масова частка цинку, %; y — масова частка фосфору, %.



Побудовані поверхні ліквідусу, міцності та відносного подовження добре погоджуються між собою і свідчать про їх пряму залежність від кількості фосфору, цинку в мідному сплаві.

Металографічні дослідження та рентгеноструктурний аналіз виплавлених експериментальних сплавів системи Cu–Zn–P–(Ni) із різним вмістом легуючих компонентів показали, що при підвищенні концентрації фосфору відбувається збільшення кількості міді й фосфіду цинку, які утворюються за реакцією:



При цьому, якщо для сплаву Cu–5P об'ємна частка α -твердого розчину на основі міді складає 42...45 об. % (рис. 3, а), то при додаванні до цього сплаву 25 мас. % Zn кількість α -твердого розчину збільшується до 65–69 об. % (рис. 3, б).

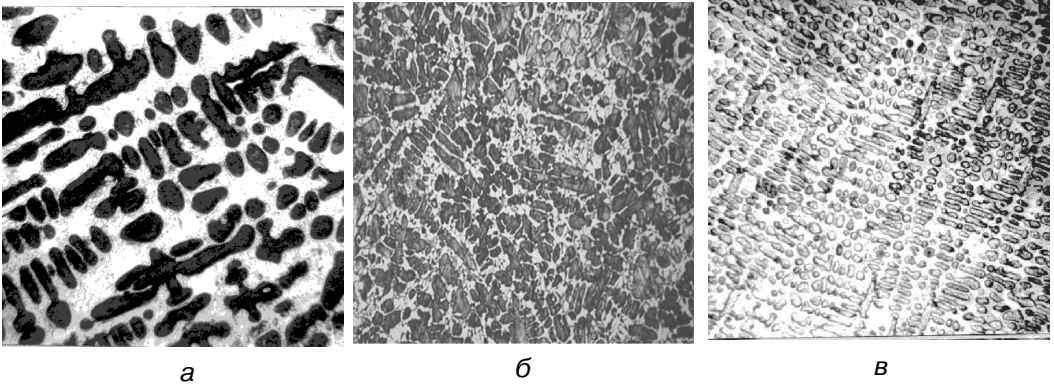


Рис. 3. Мікроструктури сплавів системи Cu–Zn–P–Ni з різним вмістом легуючих компонентів (% мас., $\times 500$): а — 5 мас.% P; б — 5 мас.% P, 25 мас.% Zn; в — 5 мас.% P, 25 мас.% Zn, 5 мас.% Ni

При цьому загальна структура легованих фосфором сплавів системи Cu–Zn–P складається з α -твердого розчину на основі міді, а також фосфідної евтектики. При подальшому збільшенні вмісту цинку (більше 30 мас. %) — у сплаві можлива поява фази на основі хімічної сполуки Cu_3Zn [12].

Під час проведення рентгеноструктурного аналізу сплавів системи Cu–Zn–P–(Ni) встановлено, що легування сплавів системи Cu–Zn–P нікелем розширює область існування α - і β -фаз до досягнення межі розчинності за даними елементами. Такий вплив нікелю зумовлений тим, що він має еквівалент Гієє рівний -1,4, що сприяє розширенню області α -твердого розчину Zn та P у міді [15, 16]. Така особливість урешті-решт призводить до подальшого збільшення частки твердого розчину до 73...77 об. % на мідно-цинковій основі у сплаві Cu–5P–25Zn–5Ni (рис. 3, в). Одночасно фіксується наявність інтерметаліду Ni_2P , легованого цинком та евтектики на основі Cu– Cu_3P , яка забезпечує зниження температури солідусу.

Проте слід зауважити, що пластичні властивості сплавів потрібної системи Cu–Zn–P дуже чутливі до вмісту фосфору. Зокрема, експериментальним шляхом визначено, що відносне видовження при вмісті фосфору $\geq 4,5$...5 мас. % (при вмісті цинку 25 мас. %) знижується до нуля (рис. 4).

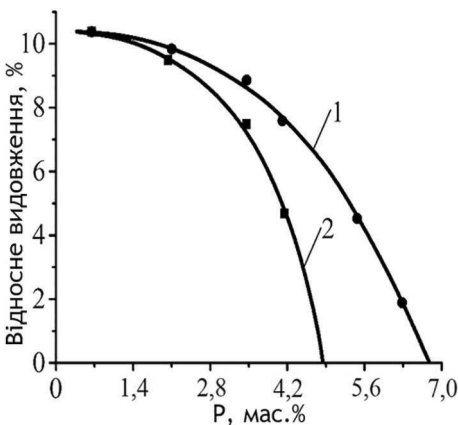


Рис. 4. Вплив вмісту фосфору на відносне видовження (%) для сплавів: 1 — Cu–25Zn–5Ni; 2 — Cu–25Zn

Цей недолік можна зменшити шляхом додаткового легування нікелем (крива 1 на рис. 4).

Експериментальним шляхом встановлено, що введення до сплаву системи Cu–Zn–5P нікелю 5 мас. % (або більше) сприяє збереженню межі міцності на рівні 450...500 МПа (рис. 5) при збільшенні відносного видовження від 0 до 6 % (рис. 4). Зауважимо, що легування 5 мас. % нікелю при вмісті цинку 25 мас. % дозволяє підтримувати відмінне від нуля відносне видовження при збільшенні концентрації фосфору до ≤ 6 мас. %. Перевищення цієї межі негативно впливає на відносне видовження і призводить до його різкого зменшення (до нуля).

Таким чином, змінюючи вміст фосфору та нікелю у сплаві, можна керувати технологічними властивостями припоїв.

Загалом роль нікелю у запобіганні крихкості мідно-цинкового сплаву з високим вмістом фосфору полягає в зміні морфологічних особливостей, зокрема збільшенні частки твердого розчину, що підвищує пластичні характеристики в цілому.

Завдяки легуванню сплаву системи Cu–Zn–P нікелем існує можливість підвищення пластичності навіть при вмісті фосфору 6 мас. %, що дозволить знизити температуру плавлення до 650 °C.

Таким чином, завдяки тому, що фосфід Ni_2P стехіометрично більш стійкий при зв'язуванні фосфору, ніж фосфід міді Cu_3P , то при утворенні фази Ni_2P мідь звільняється і формує більшу кількість пластичного мідно-цинкового твердого розчину [11, 15, 17].

Отримані експериментальні дані засвідчують, що сплави системи Cu–Zn–P–Ni з температурою плавлення 650...750 °C потенційно можуть бути використані для заміни срібних припоїв при паянні міді, мідних сплавів у суднобудуванні, машинобудуванні та інших галузях промисловості.

Висновки

- Досліджено вплив фосфору в межах 3...6 мас. %, цинку 10...30 мас. % та нікелю 3...6 мас. % на температурний інтервал плавлення, структуру та механічні властивості сплавів системи Cu–Zn–P–Ni.
- На основі експериментальних даних встановлено, що збільшення частки твердого розчину (з 42–45 до 65–69 об. %) досягається шляхом комплексного легування сплавів бінарної системи Cu–P цинком до 25 мас. % та нікелем до 5 мас. %. Що дозволяє забезпечити температурний інтервал плавлення в межах 650–750 °C при меншому вмісті фосфору і, як наслідок, доволі високому рівні пластичних властивостей (6...8 %).
- Отримані дані свідчать, що сплави системи Cu–Zn–P–Ni з температурою плавлення 650...750 °C потенційно можуть бути використані для заміни срібних припоїв при паянні міді, мідних сплавів у суднобудуванні, машинобудуванні та інших галузях промисловості.

Список літератури

- 1 Duffey, M.J., Marchal, J.T., Loney, M.R. et al. (2015). Strength of brazed joints and metallurgical testing of Cu–4Sn–6P and Cu–40Zn–1Sn–0,3Si silver-free filler metals. У Proceedings of the International Brazing and Soldering Conference. (Long Beach, USA, April 19–22, 2015), 75–79.

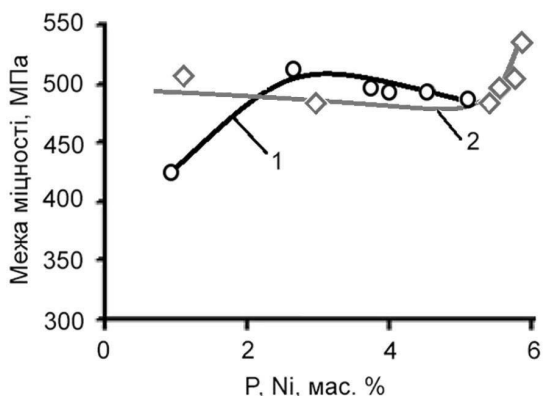


Рис. 5. Вплив вмісту фосфору (1) та нікелю (2) на механічні властивості експериментального сплаву системи Cu–Zn–P–(Ni)

- 2 Zhao, X., Chen, J., Hao, W., Huang, J., Chen, S. (2014). Effect of Phosphorus Additive on Microstructure and Spreading Behavior of a SnAgCu Solder. *У Proceedings of the International Brazing and Soldering Conference*. (Beijing, China, June 9-13, 2014), 101–106.
- 3 Wang, J., Wang, J., Li, Y., Zheng, D. (2014). Microstructure and Shear Strength in Brazing Joint of Mo-Cu Composite with 304 Stainless Steel by Ni-Cr-P Filler Metal. *High Temperature Materials and Processes*, 34(4), 347–351. <https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0048>.
- 4 Hedin, E. (2018). Influence of gap clearance on brazing joint strength for Ni and Fe based filler metals. *У Proceedings of the 7th International Brazing and Soldering Conference*. (New Orleans, Louisiana, USA, April 15-18, 2018), 155–160.
- 5 Kemmenoe, D. J., Theisen, E. A., Coughlan, W., Baker, S. P. (2018). Ni-Cr-Si-P and Ni-Cr-Si-B high corrosion resistance brazing of stainless steel: a new interpretation of single lap-joint (lap-shear) data. *У Proceedings of the 7th International Brazing and Soldering Conference*. (New Orleans, Louisiana, USA, April 15-18, 2018), 161–162.
- 6 Єрмолаєв Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф., Максимова С.В., Хорунов В.Ф., Чигарьов В.В. Паяння матеріалів: підручник / ред. Хорунов В.Ф., Квасницький В.Ф. Миколаїв. НУК, 2015.
- 7 Лашко С.В., Лашко Н.Ф. Пайка металлов. Москва: Машиностроение, 1998.
- 8 Pisarev, A.N., Khorunov, V.F., Maksymova, S.V., Tovmachenko, V.N. (2016). Possibilities of reduction of growth of intermetallic interlayer in steel brazed using brazing filler metals of copper-phosphorus system. *The Paton Welding Journal*, 7, 17–20. <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.07.03>.
- 9 Balart, M.J., Gao, F., Patel, J.B., Miani, F. (2019). Effects of Superheat and Solute Additions on the Grain Size in Binary Copper Alloys. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 8(4), 566–572. <https://doi.org/10.1007/s13632-019-00559-8>.
- 10 Jiang, F., Liu, H., Wen, K., Xu, H.H. (2013). Effect of La, Ce and Si co-addition on wettability of copper phosphorus brazing filler metal and microstructure of brazing seam. *Hot Working Technology*, 42, 202–205.
- 11 Щербинская А.В., Махновская Л.С., Федоров В.Н., Корнаухов А.С. Исследование системы Cu–Ni–P в области, богатой медью. *Известия АН СССР. Металлы*. 1984. 4. С. 227–228.
- 12 Дриц М.Е., Бочвар Н.Р., Гузей Л.С., Абrikосов Н.Х. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справочник. Москва: Наука, 1979.
- 13 Jiang, M., Wang, C.P., Liu, X.J., Ohnuma, I., Kainuma, R., Vassilev, G.P., Ishida, K. (2005). Thermodynamic calculation of phase equilibria in the Cu–Ni–Zn system. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 66 (2–4), 246–250. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2004.08.039>.
- 14 Effenberg, G., & Ilyenko, S. (2007). Non-Ferrous Metal Systems. Part 3 Volume 11C3 // Cu-Ni-Zn (Copper-Nickel-Zinc). In Landolt-Börnstein – Group IV Physical Chemistry. Berlin. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-540-47004-5_30.
- 15 Дыбков В.И. Твердофазная химическая кинетика и реактивная диффузия. Київ. НАН України, 2002.
- 16 Сучков Д.И. Медь и ее сплавы. Москва: Металлургия, 1967.
- 17 Jung-Soo, B., Joon, H.C., & Dong, L.N. (2000). Analysis of precipitate structure in a Cu-Ni-P alloy. *Scripta Materialia*, 42 (7), 637–643. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(99\)00405-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00405-4).

Надійшла 29.04.2024

References

- 1 Duffey, M.J., Marchal, J.T., Loney, M.R. et al. (2015). Strength of brazed joints and metallurgical testing of Cu–4Sn–6P and Cu–40Zn–1Sn–0,3Si silver-free filler metals. In: *Proceedings of the International Brazing and Soldering Conference*. (Long Beach, USA, April 19–22, 2015), 75–79.

- 2 Zhao, X., Chen, J., Hao, W., Huang, J., Chen, S. (2014). Effect of Phosphorus Additive on Microstructure and Spreading Behavior of a SnAgCu Solder. In: Proceedings of the International Brazing and Soldering Conference. (Beijing, China, June 9-13, 2014), 101–106.
- 3 Wang, J., Wang, J., Li, Y., Zheng, D. (2014). Microstructure and Shear Strength in Brazing Joint of Mo-Cu Composite with 304 Stainless Steel by Ni-Cr-P Filler Metal. *High Temperature Materials and Processes*, 34 (4), 347–351. DOI:10.1515/htmp-2014-0048.
- 4 Hedin, E. (2018). Influence of gap clearance on brazing joint strength for Ni and Fe based filler metals. In: Proceedings of the 7th International Brazing and Soldering Conference. (New Orleans, Louisiana, USA, April 15–18, 2018), 155–160.
- 5 Kemmenoe, D.J., Theisen, E. A., Coughlan, W., Baker, S. P. (2018). Ni-Cr-Si-P and Ni-Cr-Si-B high corrosion resistance brazing of stainless steel: a new interpretation of single lap-joint (lap-shear) data. In: Proceedings of the 7th International Brazing and Soldering Conference. (New Orleans, Louisiana, USA, April 15-18, 2018), 161–162.
- 6 Yermolayev, G.V., Kvasnyc'kyj, V.V., Kvasnyc'kyj, V.F., Maksymova, S.V., Khorunov, V.F., Chygar'ov, V.V. (2015). Pajannja materialiv: pidruchnik [Brazing of materials: The textbook], (Eds. Khorunov, V.F., Kvasnyc'kyj, V.F.) Mykolajiv. NUK [in Ukrainian].
- 7 Lashko, S.V., & Lashko, N.F. (1988). Pajka metallov [Brazing of metals], Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
- 8 Pisarev, A.N., Khorunov, V.F., Maksymova, S., Tovmachenko, V.N. (2016). Possibilities of reduction of growth of intermetallic interlayer in steel brazed using brazing filler metals of copper-phosphorus system. *The Paton Welding Journal*, 7, 17–20. DOI: 10.15407/tpwj2016.07.03.
- 9 Balart, M.J., Gao, F., Patel, J.B., Miani, F. (2019). Effects of Superheat and Solute Additions on the Grain Size in Binary Copper Alloys. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 8 (4), 566–572. DOI:10.1007/s13632-019-00559-8.
- 10 Jiang, F., Liu, H., Wen, K., Xu, H.H. (2013). Effect of La, Ce and Si co-addition on wettability of copper phosphorus brazing filler metal and microstructure of brazing seam. *Hot Working Technology*, 42, 202–205.
- 11 Scherbinskaja, A.V., Mahnovskaja, L.S., Fedorov, V.N., Kornauhov, A.S. (1984). Issledovanie sistemy Cu-Ni-P v oblasti bogatoj med'ju [Study of the Cu-Ni-P system in a copper-rich field], *Izvestija AN SSSR. Metally*, 4, 227–228.
- 12 Dric, M.E., Bochar, N.R., Guzej, L.S., Abrikosov, N.H. (1979). *Dvojnye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi: spravochnik* [Dual and multi-component copper-based systems: The guidebook], Moscow. Nauka.
- 13 Jiang, M., Wang, C.P., Liu, X.J., Ohnuma, I., Kainuma, R., Vassilev, G.P., Ishida, K. (2005). Thermodynamic calculation of phase equilibria in the Cu–Ni–Zn system. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 66 (2-4), 246–250. DOI: 10.1016/j.jpcs.2004.08.039.
- 14 Effenberg, G., Ilyenko, S. (2007). *Non-Ferrous Metal Systems. Part 3 Volume 11C3 || Cu-Ni-Zn (Copper-Nickel-Zinc)*. In Landolt-Börnstein - Group IV Physical Chemistry. Berlin. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-540-47004-5_30.
- 15 Dybkov, V.I. (2002). *Tverdofaznaja himicheskaja kinetika i reaktivnaja diffuzija* [Solid-phase chemical kinetics and reactive diffusion], Kyiv. NAS of Ukraine [in Russian].
- 16 Suchkov, D.I. (1967). *Med' i ee splavy* [Copper and its alloys]. Moskva: Metallurgija [in Russian].
- 17 Jung-Soo, B., Joon, H.C., Dong, L.N. (2000). Analysis of precipitate structure in a Cu-Ni-P alloy. *Scripta Materialia*, 42 (7), 637–643. DOI: 10.1016/S1359-6462(99)00405-4.

Received 29.04.2024

S.V. Maksymova, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Department;
e-mail: maksymova.svitlana15@ukr.net; ORCID: 0000-0003-0158-5760

A.M. Pysarev, Researcher; ORCID: 0000-0002-6615-6847

V.V. Voronov, PhD (Engin.), Senior Researcher; e-mail: vorona76@ukr.net;
ORCID: 0000-0002-0410-1154

E. O. Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

THE INFLUENCE OF ALLOYING ELEMENTS ON THE TECHNOLOGICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF Cu–Zn–(Me) ALLOYS

Copper-based brazing filler metals with a melting temperature of 600–650 °C, which have a sufficient level of strength and plasticity characteristics, are in demand in modern mechanical engineering. The paper presents the results of research on the assessment of the influence of alloying elements on the technological and mechanical properties of Cu–P–(Zn, Ni) alloys. With the help of conducted studies of high-temperature differential thermal analysis, mechanical tests and with the use of statistical processing of the results, regression equations were obtained that describe the dependence of liquidus and solidus temperatures, as well as the limits of strength and relative elongation of alloys depending on the content of zinc and phosphorus. Based on the results of Cu–P–(Zn, Ni) alloys metallographic studies, the effect of phosphorus, zinc and nickel on the volume fraction of the solid solution was determined. In particular, it was established that doping alloys of the binary Cu–P system with zinc up to 25 wt. % leads to an increase in the proportion of solid solution in them from 42–45 to 65–69 vol. %. An additional increase in the amount of solid solution in the alloy (up to 72–75 % by volume) is achieved by doping the alloy of the Cu–P–Zn system with nickel (up to 5 % by mass), which allows to obtain an alloy with a strength limit at the level of 450...500 MPa while maintaining plastic characteristics ($\delta = 6\%$). It should be noted that doping 5 wt. % of nickel with a zinc content of 25 wt. % makes it possible to maintain non-zero relative elongation at a phosphorus content of 5.5...6 wt. %. This alloying of alloys of the Cu–P–(Zn, Ni) system provides a melting temperature in the range of 650–750 °C with a lower concentration of phosphorus, and, as a result, a sufficiently high level of plastic properties (up to 6...8 %). Based on the results of the research, the composition Cu–P–(Zn, Ni) alloys was determined, which can potentially be used as a filler metals for brazing copper and copper alloys.

Keywords: copper-phosphorus alloys; brazing filler metals; brazing; phosphorus; zinc; nickel; mechanical properties.