

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ НАПЛАВЛЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ШАРІВ НА МІДЬ ТА МІДНІ ДЕТАЛІ (Огляд)

А.А. Бабінець¹, І.О. Рябцев¹, І.П. Лентюгов¹, І.І. Рябцев¹, Ю.В. Демченко¹, А.І. Панфілов²

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

²ТОВ «Стіл Ворк». 50065, м. Кривий Ріг, вул. Соборності, 32. E-mail: a.panfilov@steel-work.net

На підставі результатів літературного аналізу показана перспективність використання методів електродугового і плазмово-порошкового наплавлення для підвищення зносостійкості деталей з міді. Проведено вибір перспективних матеріалів для наплавлення зносостійких шарів на мідні поверхні даними методами. Виконана порівняльна оцінка фізико-механічних властивостей міді та основних легуючих елементів перспективних матеріалів для наплавлення. Бібліогр. 31, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: наплавлення на мідь, зносостійкий шар, підвищення зносостійкості, мідь, різноманітні метали, зварюваність, зона сплавлення

Мідь має такі унікальні властивості, як висока електро- і теплопровідність, пластичність та корозійна стійкість, які вона зберігає в широкому діапазоні температур ($-253 \dots 500$ °C) [1–7]. Такі властивості дозволяють широко використовувати мідь та її сплави в різних галузях промисловості при виготовленні кабельної та електроконтактної продукції, теплообмінників, кристалізаторів, фурм, трубопроводів, деталей хімічної апаратури тощо.

Водночас, через низьку жаро- та зносостійкість [8], мідь обмежено використовується в деяких галузях металургійної промисловості, зокрема, в умовах контакту з розплавленим металом, високотемпературними газовими потоками, агресивними газами й абразивними речовинами. В таких екстремальних умовах експлуатації мідні деталі швидко зношуються, крім того, на їх поверхнях та зварних швах можуть утворюватися такі дефекти як прогар, корозія, тріщини і т. п. [5–9].

У зв'язку з цим виникає питання по підвищенню довговічності мідних деталей, при виготовленні яких часто виникає необхідність з'єднання міді та її сплавів зі сталями й сплавами інших систем легування [3]. Виходячи з того, що в промисловості значну частину собівартості продукції становлять витрати на ремонт агрегатів, змінне устаткування та запасні частини [10], питання підвищення зносостійкості мідних деталей, які експлуатуються в складних умовах підвищених температур та механічних навантажень, різних видів зношування, корозії та інших несприятливих факторів на даний час є достатньо актуальним.

Одним з можливих шляхів вирішення цього питання є створення на мідних деталях захисних наплавлених шарів з високими експлуатаційними властивостями. Однак дотепер, в основному, добре

вивчені питання безпосереднього зварювання міді та її сплавів зі сталлю, а також наплавлення міді, бронзи або латуні на сталь з метою економії кольорових металів [1–9]. Зворотне питання – по наплавленню на мідь зносостійких сплавів різних систем легування на сьогодні залишається практично не вивченим. У першу чергу, це пов'язано з великими складнощами, що виникають при наплавленні сплавів, які мають значно більш високу температуру плавлення, меншу теплопровідність та інші фізико-механічні характеристики, які суттєво відрізняються від аналогічних характеристик міді.

Аналіз способів одержання зносостійких шарів на мідних поверхнях. Питання зварюваності таких різноманітних матеріалів як сталь і мідь, із забезпеченням необхідних фізико-хімічних властивостей як зносостійкого шару, так і всієї деталі в цілому, вимагає розробки таких технологічних процесів, які враховують не тільки металургійну сумісність, але й різницю у фізичних властивостях з'єднуваних матеріалів: теплопровідність, теплоємність, температуру плавлення, електропровідність, коефіцієнти термічного розширення (КТР) та ін. [1].

Літературний аналіз показує [11–14 та ін.], що для вирішення даного питання найчастіше застосовуються методи газотермічного нанесення покриттів різного складу, а також є розрізнені дані про застосування деяких методів наплавлення або зварювання у твердій фазі.

Так, спосіб газотермічного нанесення покриття одержав досить широке застосування в промисловості завдяки своїй універсальності, яка дозволяє використовувати різноманітні матеріали: метали (у тому числі тугоплавкі типу W і Mo), сплави на основі Ni і Co, кераміки на основі оксидів Zr та ін. [15].

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

І.П. Лентюгов – <http://orcid.org/0000-0001-8474-6819>, І.І. Рябцев – <http://orcid.org/0000-0001-7550-1887>,

Ю.В. Демченко – <http://orcid.org/0000-0002-7899-6608>

© А.А. Бабінець, І.О. Рябцев, І.П. Лентюгов, І.І. Рябцев, Ю.В. Демченко, А.І. Панфілов, 2020

Пропонувалося застосовувати цей спосіб [11] і для підвищення стійкості деяких мідних деталей, які експлуатуються в умовах високотемпературного газоабразивного зношування. Для цього на мідну поверхню наносили шари алюмовмісного покриття товщиною 0,1...0,5 мм. Однак, незважаючи на те, що середня стійкість деталей, зміцнених таким методом, підвищилася у 1,5...2,0 рази, було відзначено неконтрольовану появу ушкоджень, викликаних раптовим відшаруванням покриття в процесі експлуатації, внаслідок невисокої міцності отриманого з'єднання й значної різниці КТР у покриття та міді (рис. 1) [11].

Для усунення даного недоліку авторам роботи [8] було рекомендовано застосовувати додаткову термообробку, при якій відбувається дифузія алюмінію в мідь, що повинно було підвищити міцність зчеплення покриття з основним металом і дати можливість одержати шар, який має в порівнянні з міддю більш високі жаро- та зносостійкість.

Однак термообробка не завжди забезпечує підвищення міцності зчеплення покриття й мідної основи [11]. Це пояснюється тим [5], що через дифузію елементів покриття в мідь значно знижуються їхні концентрації в дифузійному шарі й підвищується кількість у ньому крихких оксидів, що, навпаки, може сприяти відшаруванню частини цього шару зі сторони покриття.

У роботі [16] це явище було розглянуто більш детально. З рис. 2 видно, що між покриттям і основою наявні мікроскопічні тріщини, які при тривалій експлуатації в умовах зношування поєднуються в уламки (рис. 2, б), відшаровуються й утворюють пластинки продуктів зношування. Авторами цієї ж роботи відзначено, що розшару-

вання є домінуючим механізмом зношування зразків, отриманих даним способом, а сам спосіб є трудомістким і має низьку продуктивність.

У роботі [17] відзначено, що застосування плазмового способу нанесення захисних покриттів різного складу на мідну основу дозволяє підвищити зносостійкість у порівнянні із чистою міддю в 1,5...3,0 рази. Однак треба відзначити, що застосування тонких покриттів (0,5...0,7 мм) в умовах значного газоабразивного зношування не дає змоги значно підвищити довговічність таких деталей.

Загальновідомо, що методи наплавлення знайшли широке застосування як при виготовленні нових, так і при ремонті зношених деталей [10], через те що вони дозволяють значно підвищити їхню довговічність за рахунок наплавлення різних за складом шарів, які відрізняються від основного металу своїми фізико-хімічними властивостями [18, 19]. Крім того, наплавлення дозволяє досягти значно більш високої міцності з'єднання основного і наплавленого металів, ніж при нанесенні газотермічних покриттів.

Однак дотепер досить добре було вивчене питання наплавлення саме кольорових металів на сталь, а не навпаки. Для першого випадку найбільш простим і ефективним є використання методів наплавлення плавким електродом із застосуванням у якості захисного середовища спеціальних газів або флюсів [9, 20].

Слід зазначити, що основним недоліком дугових методів наплавлення є істотна глибина проплавлення, що може привести до надмірного перемішування кольорового металу зі сталлю й появи тріщин і пор у наплавленому шарі [20]. Однак,

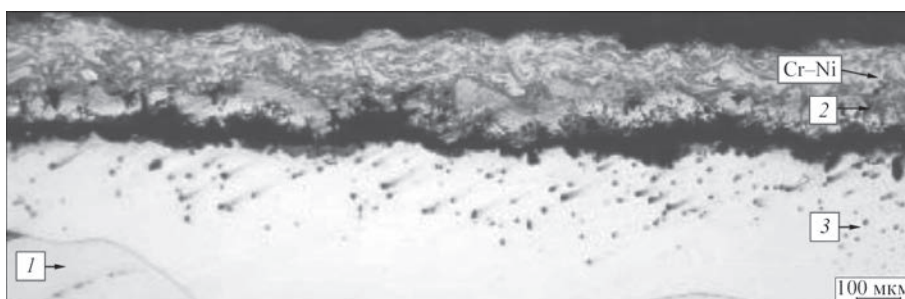


Рис. 1. Мікроструктура мідного зразка з алюмінієвим підшаром та Cr-Ni напиленням [11]: 1 – мідна основа; 2 – пористий шар; 3 – α -фаза

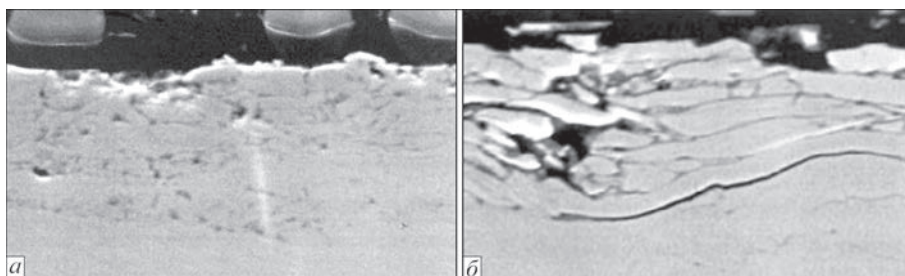


Рис. 2. Мікроструктура приповерхнього шару покриття, отриманого після газотермічного напилювання та зміцнюючої термообробки [16]: а – наявність мікротріщин під поверхнею; б – утворення пластинок і їх відшаровування

незважаючи на те, що велика глибина проплавлення характерна, наприклад, для способу зварювання під флюсом, він, тим не менш, досить часто використовується при зварюванні мідних і сталевих деталей товщиною 5...40 мм [9, 14, 21].

Більшою універсальністю характеризується спосіб наплавлення у захисних газах. Основна його перевага – можливість візуального спостереження за процесом і його оперативного корегування в разі потреби [20, 22]. Спеціальні способи наплавлення, такі як імпульсно-дугове, розщепленим або стрічковим електродом та ін., дозволяють знизити глибину проплавлення, однак вони мають певні обмеження по технологічності їх застосування, наприклад, при напавленні стрічками виробів складної геометричної форми [20].

Разом з тим, виходячи з даних у технічній літературі й практичного досвіду [23, 24] відомо, що зменшити глибину проплавлення при напавленні електродними дротами можливо за рахунок оптимізації електричних параметрів дугового наплавлення й застосуванні дротів малих діаметрів (до 2,0 мм).

Також відомо, що одним зі способів наплавлення, які забезпечують мінімальне проплавлення основного металу, що дозволяє знизити частку його участі в напавленому шарі, є плазмове наплавлення [4, 25, 26]. Крім того, його перевагою є широкий діапазон регулювання параметрів режиму наплавлення й можливість використання широкого класу матеріалів, а також виконання попереднього підігріву виробу без використання сторонніх джерел тепла [4, 17, 25].

Однак у технічній літературі відомості про застосування як електродугового, так і плазмового наплавлення для зміцнення поверхонь деталей із чистої міді вельми обмежені. Наприклад, у роботі [26] описано спосіб плазмового наплавлення кобальтових і нікелевих сплавів на алюмінієві бронзи. Практично єдиними згадуваннями в літературі про методи наплавлення сталей і сплавів на чисту мідь є роботи [17, 27], в яких описується метод одержання захисних шарів товщиною 1,5...2,0 мм за допомогою електронно-променевого наплавлення. При використанні цього методу досягнуто гарної адгезії захисного матеріалу на основі карбідів тугоплавких металів з поверхнею мідної основи, а довговічність деталей з таким зміцненням підвищилась до двох разів.

Разом з тим даний метод має певні недоліки. Крім досить складного й дорогого устаткування, у процесі наплавлення частина порошку, який наплавляється, не потрапляє у зварювальну ванну [27]. Для вирішення цієї проблеми авторами роботи [27] було внесено кардинальні зміни у технологію електронно-променевого наплавлення – на першому етапі

виконували газополуменеве напилювання покриття, яке потім оплавливали електронним пучком. Однак такі додаткові операції ще більш ускладнили процес наплавлення та підвищили імовірність появи різних дефектів у напавленому виробі.

Окремо варто згадати про такі спеціальні методи одержання біметалічного з'єднання сталь-мідь, як зварювання вибухом, зварювання тиском з підігрівом, зварювання тертям з перемішуванням, високотемпературний синтез та ін. [12, 13, 17, 28]. Незважаючи на те, що дані способи дозволяють одержати досить надійне з'єднання, застосування їх для створення зносостійких шарів часто суттєво обмежене геометричними розмірами й формами самих деталей. Крім того, вони мають і свої недоліки, наприклад, при детонаційному способі на межі з'єднання можливо утворення повітряних порожнин, що може приводити до ерозійного руйнування покриття і його сколювання [13].

Вибір зносостійких матеріалів для наплавлення на мідні поверхні. Виходячи з даних літературного аналізу, можна виділити кілька класів матеріалів, які підходять для вищенаведених умов експлуатації [10, 25]:

- теплостійкі сталі, комплексно леговані хромом, молібденом, нікелем і т. д.;
- високовуглецеві високохромисті сплави на основі заліза (типу сормайт);
- сплави на нікелевій або кобальтовій основі.

Теплостійкі сталі системи легування Fe–C–Cr–Mo–V широко використовуються для зміцнення деталей металургійного устаткування, яке працює в умовах циклічних теплових, високих динамічних навантажень у комбінації з абразивним зношуванням. Сталі з високим вмістом вольфраму мають найбільшу твердість і теплостійкість при високих температурах, однак термічна стійкість і ударна в'язкість таких сталей порівняно невисока [10]. Заміна вольфраму молібденом (повна або часткова) знижує теплостійкість сталі, однак суттєво підвищує її термічну стійкість. Сталі даного класу при напавленні схильні до утворення тріщин, тому наплавлення ведуть із попереднім, а іноді й із супутнім підігрівом.



Рис. 3. Зовнішній вигляд головки фурми доменної печі, напавленої електронно-променевим способом [27]

Високовуглецеві високохромисті сталі із вмістом вуглецю та хрому до 5 та 30 %, відповідно, широко використовуються для наплавлення деталей, які працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування при високих температурах (до 1000 °C) [10]. Для наплавлення цими матеріалами можна використовувати різні способи, однак технологія наплавлення пов'язана зі значними складнощами з метою запобігання утворення тріщин. Здебільшого для цього використовують попередній та супутній підігрів деталі до 600 °C, а після наплавлення деталь поміщають в піч, нагріту до температури 650...700 °C та повільно охолоджують разом з нею.

Сплави 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 Хастелой та Інконель систем легування типу Ni–Cr–Mo–Nb [10]. За даними численних досліджень [6, 7, 21, 27 та ін.], застосування матеріалів, легованих нікелем, дозволяє одержати метал із кращими показниками по зварюваності, корозійній стійкості й зносостійкості. Крім того, за деякими даними [21], додаткове легування нікелем при наплавленні мідних сплавів на чавун сприяє більш рівномірному розподілу основного металу в наплавленому, без утворення окремих включень заліза у верхньому шарі міді.

Сплави на кобальтовій основі системи легування Co–C–Cr–W характеризуються високою зносостійкістю, жароміцністю, корозійною стійкістю та ін. у багатьох агресивних середовищах [10]. Твердість таких сплавів при температурах понад 650 °C вище, ніж у сплавів на основі нікелю. Основним недоліком кобальтових сплавів є їхня висока вартість, а також схильність до утворення тріщин.

З точки зору зварюваності важливе значення має взаємна розчинність основних легуючих елементів сталей та сплавів, які були зазначені вище, і міді. Діаграми стану відповідних подвійних систем наведено на рис. 4 [29].

1) Вуглець. Діаграма стану Cu–C (рис. 4, а) показує, що мідь у твердому й рідкому станах перебуває в рівновазі з вуглецем. Розчинність вуглецю у рідкій міді у мас. % становить: 0,0001 при 1100 °C; 0,00015 при 1300 °C та 0,003 при 1700 °C. Є дані, що поблизу температури кипіння мідь розчиняє до 1 мас. (5 ат.) % C, який навіть при різкому загартуванні виділяється з розчину у вигляді графіту [29].

2) Залізо. Мідь із залізом утворює розчин з розчинністю заліза в розплавленій міді до 3,0 % при температурі 1025 °C (рис. 4, б). Розчинність міді у γ-Fe при температурах 1470, 1370 і 1100 °C стано-

вить 10,0; 12,0 і 8,0 % (ат.), відповідно. У даній системі наявні дві перитектичні і одна евтектоїдна рівноваги, а при сильному переохолодженні (ступінь переохолодження 100 °C і вище) з'являється область незмішуваності в рідкому стані. Критична температура змішування лежить на 20 °C нижче температури ліквідусу при еквіатомному з'єднанні [29].

3) Нікель. З конструкційних металів тільки в системі Cu–Ni складові її метали мають необмежену взаємну розчинність та характеризуються утворенням у процесі кристалізації безперервного ряду твердих розчинів (Cu, Ni) із гранецентрованою кубічною структурою (рис. 4, в). Також є деякі розрахункові дані про наявність границі розшарування твердого розчину й критичної точки незмішуваності, які відповідають концентрації Ni 69,7 % (ат.) та температурі 342 °C та пов'язані із магнітним перетворенням Ni [29].

4) Кобальт. Система Cu–Co (рис. 4, г) є діаграмою перитектичного типу. У твердому стані має місце евтектоїдне перетворення. Максимальна розчинність міді в α-Co досягається при температурі 1367 °C і становить 19,7 % (ат.). У сплавах системи Co–Cu в результаті сильного переохолодження (на 100 °C й більше) з'являється область незмішуваності в рідкому стані, яка майже симетрична щодо осі з'єднання. При еквіатомному з'єднанні критична точка змішування лежить на 90 °C нижче кривої ліквідусу [29].

5) Хром. Згідно з діаграмою стану Cu–Cr (рис. 4, д) у даній системі є наявність евтектичної рівноваги та існування двох твердих розчинів на основі Cu і Cr. Однак характер фазових рівноваг у високотемпературній області при концентраціях 0...55 % (ат.) Cu є неоднозначним. Прийнято вважати, що у всьому інтервалі концентрацій у сплавах, які містять від 4 до 45 % (ат.) Cu, має місце монотектична рівновага при температурі 1767±8 °C і концентрації 18,8 % (ат.) Cu. Область розшарування двох рідин простягається від 18,8 до 45 % (ат.) Cu у вузькому інтервалі температур, верхня границя якого не перевищує 1900 °C. Також підтвержене існування двофазної області (Рідина + Cr) в інтервалі концентрацій 42...97 % (ат.) Cr при температурі 1550 °C. Максимальна розчинність хрому в міді при температурі 1076,6 °C становить 0,89 % (ат.) [29].

6) Молібден. Діаграма стану Cu–Mo експериментально не побудована, через те що Cu і Mo не змішуються в рідкому й твердому стані, а взаємна розчинність компонентів при температурі 900 °C надзвичайно мала. Тому діаграму стану даної системи, яку представлено на рис. 4, е, було отримано винятково розрахунковими методами, згідно з якими, у системі мають місце монотектична й евтектична рівноваги. Розчинність Mo в Cu стано-

виставляють 1,91 і 2,50 % (ат.) при температурах 1900 і 2100 °С відповідно, а розчинність Cu в Mo становить 2,3 % (ат.) при температурі 950 °С [29].

Враховуючи вищевикладене, досить перспективними виглядають ідеї по наплавленню на мідь зносостійких сплавів на основі заліза, нікелю або кобальту, комплексно легованих іншими елементами, які мають високу взаємну розчинність з міддю. Це

має сприяти зменшенню хімічної неоднорідності та зниженню ймовірності виділення окремих включень як в основному, так і в наплавленому металі.

Проблеми зварюваності сплавів на основі заліза, нікелю та кобальту з міддю. Розглядаючи можливість наплавлення зносостійких сплавів на мідню основу, варто відзначити, що за деякими даними [30], при зварюванні міді зі сталлю,

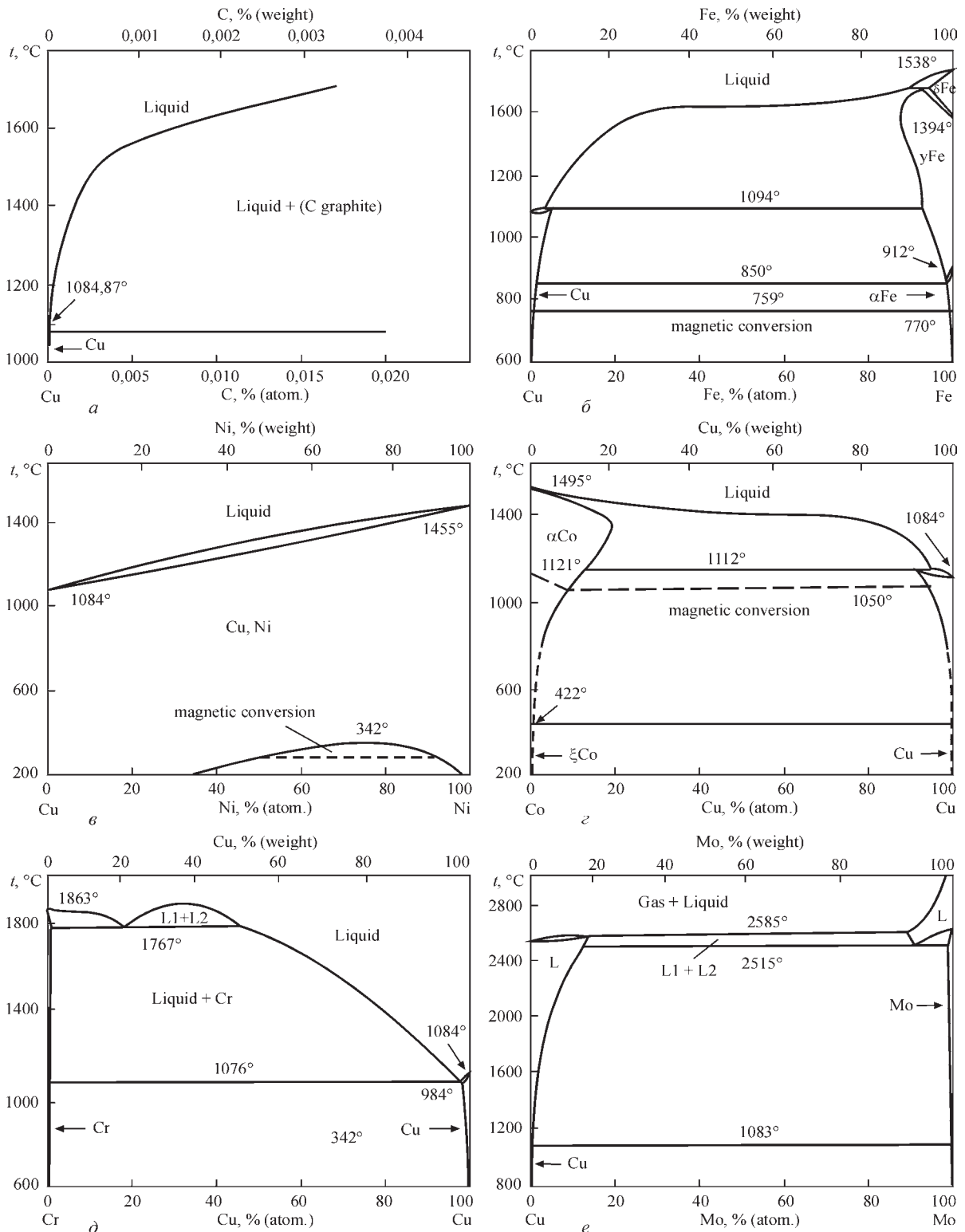


Рис. 4. Діаграми стану подвійних систем Cu–C (а), Cu–Fe (б), Cu–Ni (в), Co–Cu (г), Cr–Cu (д) та Cu–Mo (е) [29]

Порівняння кристалографічних і фізичних властивостей чистої міді, заліза, нікелю й кобальту [31]

Показник	Cu	Fe	Ni	Co
Атомна маса	63,54	55,85	58,69	58,93
Тип кристалічної решітки	г.ц.к.	γ – г.ц.к.; α – о.ц.к.	г.ц.к.	г.ц.к.
Температура плавлення, °C	1083	1535	1453	1494
Температура кипіння, °C	2310	2450	2732	2960
Коефіцієнт термічного розширення на 1 °C, 10^{-6}	17,06	12,15	13,6	12,5
Теплопровідність, Вт/(м·K)	413	94	107	122
Питома теплоємність, Дж/(кг·K)	385	449	500	244
Питомий електроопір, Ом·м, $\cdot 10^{-8}$	1,68	10,0	6,99	5,68
Щільність, кг/м ³	8930	7850	8900	8900

використання підвищеного вмісту залізного порошку приводить до негативного впливу на якість отриманого з'єднання. Це відбувається через підвищену концентрацію дендритів заліза на границі сплавлення, що з одного боку забезпечує підвищення твердості зварного шва й його міцності, але разом з тим зменшує пластичність зварного шва, через що в ньому з'являються дефекти, тим самим знижуючи експлуатаційні властивості зварного з'єднання [21].

А от з'єднання нікелю з міддю відносно легко може бути досягнуто способами зварювання плавленням без присадки або із присадкою міді, нікелю, мідно-нікелевих сплавів [1–3]. Границя сплавлення такого з'єднання різка й має яскраво виражені перехідні шари. Однак згідно даних роботи [3] це не вважається недоліком, тому що міцність такого з'єднання досить висока й руйнування відбувається поза зоною сплавлення.

Для оцінки зварюваності сплавів на основі заліза, нікелю й кобальту з міддю потрібно, насамперед, порівняти між собою їх основні властивості (таблиця).

З таблиці видно, що істотна різниця у деяких фізичних властивостях у даних металів може погіршувати їхню зварюваність. Крім того, негативно на зварюваність впливає також підвищена окисність міді й значне поглинання нею газів [4].

За даними [4, 9, 22] можна виділити такі основні фактори, які впливають на зварюваність сплавів на основі заліза, нікелю та кобальту з міддю:

- висока теплопровідність міді, що приводить до високих швидкостей охолодження й потреби застосування або джерел зварювального нагрівання з дуже великою погонною енергією, або значних температур попереднього й супутнього підігріву, а найчастіше і того й іншого;

- значно нижча температура плавлення міді;

- малий час існування зварювальної ванни в рідкому стані, що обмежує можливості її металургійної обробки й потребує активних розкислювачів;

- значний КТР міді, що ускладнює закріплення й збереження положення деталей у процесі зварювання, і що визначає необхідність вживання додаткових заходів проти деформації конструкцій;

- висока рідкотекучість міді, що накладає обмеження на використовувані просторові положення деталей, які наплавляються, а також, наприклад, у процесі накладення кільцевих валиків при наплавленні циліндричних деталей;

- істотний вплив домішок на властивості й зварюваність міді, що вимагає використання металу зі строго регламентованим вмістом кисню, вісмуту, свинцю, сірки й сурми;

- висока чутливість міді до водню, що вимагає вживання особливих заходів до зниження його вмісту в зоні зварювання для запобігання утворення пор;

- легка окисність міді в розплавленому стані, яка приводить до утворення легкоплавких евтектик, що знижує стійкість металу шва проти утворення кристалізаційних тріщин.

Під впливом цих факторів виділяють кілька основних проблем, характерних для зварювання міді й вищевказаних сплавів: утворення гарячих тріщин, у тому числі й заповнених кольоровим металом; утворення крихких прошарків; а також значне взаємне проникнення на границі мідь–сплав [1–3, 20]. Наведені нижче дані більш докладно розкривають окреслені проблеми, проте в основному стосуються зварних з'єднань типу мідь–сталь або випадків наплавлення міді на сталь, адже питання з'єднання плавленням міді зі сплавами на основі нікелю й кобальту в технічній літературі практично не освітлені.

За даними роботи [2], при зварюванні міді зі сталлю, зі збільшенням вмісту міді в металі шва більше 3 %, схильність до утворення гарячих тріщин різко зростає. У цьому випадку, при кристалізації металу шва мідь, через обмежену розчинність у сталі, виділяється по границях зерен і під дією розтягувальних напруг і ефекту Ребіндера утворюються тріщини.

Початкове проникнення міді по границях зерен сталі, що протікає під впливом капілярного ефекту, дифузії й розчинення сталі в міді, полегшується далі тим, що поверхнева енергія на границі Fe–Cu приблизно у два рази менше, ніж на границі Fe–Fe. Тому міцність границі зерна, яке перебуває в контакті з рідкою міддю, виявляється зниженою, а напруження розтягнення, які розвиваються у металі – достатніми для остаточного розриву ослабленої

границі й миттєвого заповнення новоутвореної тріщини міддю (рис. 5). Проникнення кольорового металу в сталь на глибину більше 2,5 мм у деяких випадках знижує статичну й, особливо, втомну довговічність сталі [2]. Крім тріщин у звичайному розумінні для наплавлення міді на сталь характерними є дефекти типу «залікованих» тріщин, які повністю заповнені міддю або мідним сплавом.

Для усунення цих дефектів у роботі [3] пропонується додавати у зварювальну ванну певну кількість алюмінію. В цьому випадку отримані зварні з'єднання міді з низьковуглецевою сталлю мали більш високі показники механічних властивостей за наявності у шві алюмінію в порівнянні з відповідними характеристиками без алюмінію. Також введення у зварювальну ванну алюмінію сприятливо позначалося на структурі металу шва й навколошовної зони.

Зварюваність міді зі сталлю погіршує утворення в навколошовній зоні по границі сплавлення проміжних крихких прошарків (рис. 6). Їхнє виникнення й розвиток пов'язаний з дифузиею деяких елементів зі сталі в мідь. Щоб попередити утворення прошарків такого типу рекомендується попереднє наплавлення проміжних шарів зі сплавів, які зменшують можливість утворення крихких прошарків і переходу заліза в мідь та навпаки [2].

Вивчення фізико-механічних властивостей зварних з'єднань мідь-низьковуглецева сталь, які експлуатуються при змінних температурах, показало [14], що при масовій частці заліза до 2 % метал зварного шва рівномірний з основним металом (міддю) у всьому температурному інтервалі випробувань. Вміст заліза в міді більше 7 % викликає різке зниження пластичних властивостей з'єднання, що може привести до утворення гарячих тріщин. Комплексна оцінка механічних властивостей, тривалої міцності, термоциклічної довговічності й характеру руйнувань показало, що при експлуатації зварних з'єднань мідь-низьковуглецева сталь в умовах підвищених і змінних температур оптимальним є вміст 3...6 % заліза в металі шва [14].

Щодо глибини взаємного проникнення мідь-сталь, то згідно даних [2], припустима глибина проникання, яка не впливає на механічні властивості сталі, обмежується 0,3...0,5 мм. Проте за іншими даними [3] проникання мідного сплаву у високоміцну сталь на глибину до 1,2 мм практично не позначається на статичній і циклічній міцності при розтяганні, статичному та ударному вигині біметалічних зразків.

Проблеми наплавлення сплавів на основі заліза, нікелю й кобальту на мідь і шляхи їх вирішення. Розглядаючи можливість наплавлення зносостійких шарів на мідню основу, до викладених вище проблем, що виникають при одержанні зварного з'єднання сталь (сплав) – мідь, додаються проблеми, викликані технологічними особливостями протікання такого процесу.

По-перше, як відзначалося раніше, це завдання на сьогоднішній день залишається практично невивченим – відомо лише кілька згадувань у технічній літературі про методи електронно-променевого наплавлення деяких марок сталей на мідь, однак ці результати не завжди виглядають достовірними й економічно виправданими.

По-друге, усі відомі зносостійкі сталі й сплави мають значно більш високу температуру плавлення, ніж мідь (≈ 1500 °С проти ≈ 1100 °С). На перший погляд, це повинно приводити до підвищеного проплавлення міді. Однак внаслідок високої теплопровідності міді (у понад 4 рази більше, ніж у сталі – див. таблицю), краплі рідкого наплавленого металу можуть швидко втратити тепло, що приведе до різкого зниження рідкотекучості й змачуваності та, як наслідок, до поганого формування наплавленого металу на мідній поверхні або навіть до відсутності формування й сплавлення. Адже широко відомо [9], що при зварюванні сталевих листів в стик для забезпечення повного проплавлення й гарного формування зворотної поверхні шва, на виробництві часто застосовуються мідні підкладки, які досить легко знімаються після завершення зварювання й не мають слідів схоплювання зі зварним швом.

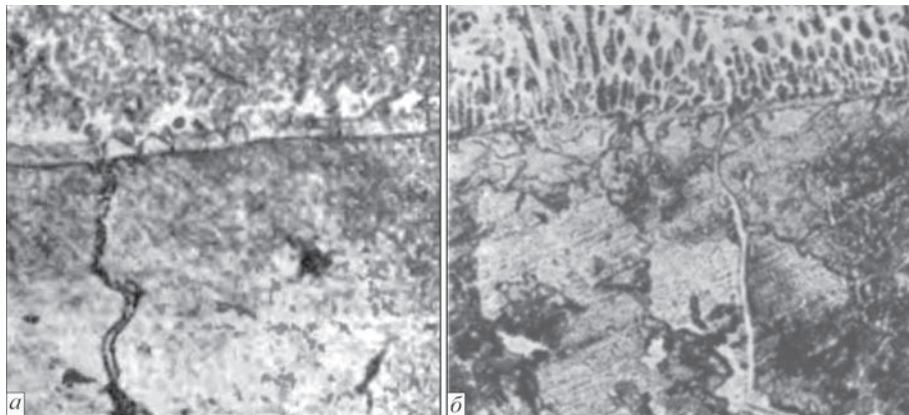


Рис. 5. Зона сплавлення при аргодуговому наплавленні бронзи Бр. А5 на сталь Ст3 (а) і бронзи Бр. АНЖ6-3-1 на сталь 20 (б), $\times 300$ [2]

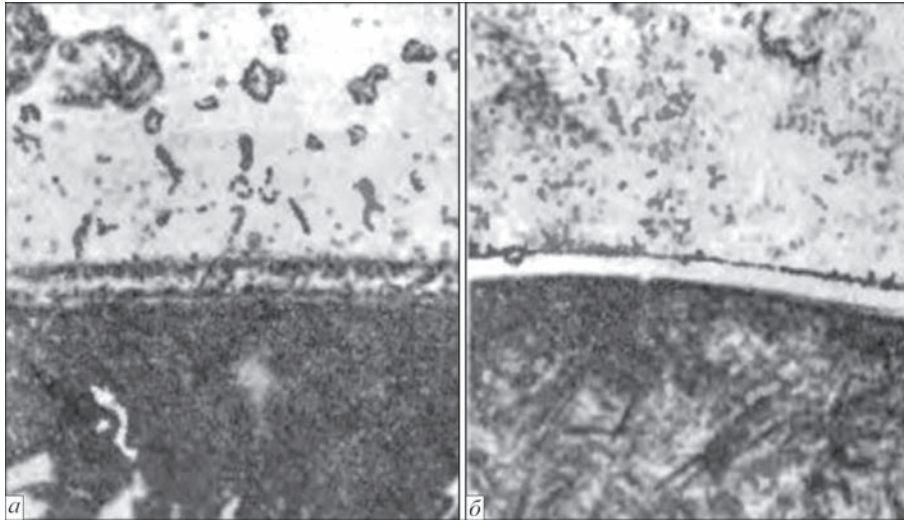


Рис. 6. Крихіткі прошарки в зоні сплавлення при плазмовому наплавленні бронзи Бр.АМц9-2 на сталь 20 (а) і бронзи Бр. КМц3-1 на сталь 38ХНМА (б), $\times 300$ [2]

Крім того, через більш високу теплопровідність мідь буде дуже швидко розігріватися в процесі наплавлення, що підвищує ймовірність перегріву й наступного наскрізного проплавлення мідної основи.

По-третє, вищеописані відмінності у фізичних властивостях сталей та міді будуть створювати великі градієнти температури й високі швидкості охолодження у зварювальній ванні, а також малий час перебування зварювальної ванни в рідкому стані. Це може привести до того, що при кристалізації зварювальної ванни у наплавленому зносостійкому металі можуть виникнути окремі включення міді, які будуть мати низькі механічні властивості, що надалі може понизити експлуатаційні властивості наплавленого металу.

Виходячи з відсутності якихось рекомендацій у технічній літературі про особливості протікання процесу наплавлення нікелевих і кобальтових сплавів на чисту мідь (як і сплавів на основі заліза), можна лише відштовхуватися від даних по фізико-хімічних властивостях даних металів з врахуванням того, що і нікель, і кобальт також як і залізо, значно відрізняються від міді по температурі плавлення й теплопровідності. А тому, при наплавленні вищевказаних сплавів на мідь, для них деякою мірою будуть справедливими відзначені вище закономірності, які були визначені для випадків зварювання міді зі сталлю та наплавлення міді та її сплавів на сталь.

Для вирішення всіх перелічених вище проблем, необхідний ретельний і обґрунтований вибір техніки й технології наплавлення, матеріалів для наплавлення, а також дотримання достатньо вузького температурного інтервалу попереднього й супутнього підігріву мідних деталей. Із врахуванням вищевикладеного та практичного досвіду, перспективно виглядають такі способи наплавлення, як електродуговий у захисних газах дротами відповідного ле-

гування, а також плазмово-порошковий сплавами на основі заліза, нікелю та кобальту.

При цьому позитивний вплив на якість сплавлення зносостійкого шару та мідної основи може дати застосування технологічних прийомів, що зменшують проплавлення і частку основного металу в наплавленому металі, а також за рахунок регулювання погонної енергії наплавлення. При найбільш поширеному в промисловості дуговому наплавленні цього можна досягти за рахунок застосування електродних дротів малого діаметру (діаметром 1,2...2,0 мм); помірних електричних режимів, при яких забезпечується стабільне перенесення електродного металу і мінімальне проплавлення основного металу; а також застосування імпульсних, магнітно-імпульсних і т. п. технологій. На нашу думку, такий комплексний підхід повинен з однієї сторони сприяти одержанню якісного сплавлення зносостійкого шару з міддю, а з іншої – не допускати перегріву мідної основи, що може призвести до зміни геометричних розмірів деталі.

Таким чином, не дивлячись на значні складності, які виникають при зносостійкому дуговому або інших способах наплавлення на мідь, ці процеси є досить перспективними з точки зору забезпечення значного збільшення довговічності мідних деталей, які експлуатуються в умовах інтенсивного абразивного і газоабразивного зношування, а також зношування при високотемпературному терті металу по металу.

Список літератури/References

1. Mvola, B., Kah, P., Martikainen, J. (2014) Welding of dissimilar non-ferrous metals by GMAW processes. *Inter. J. of Mechanical and Materials Eng.*, **9**, 21. DOI:10.1186/s40712-014-0021-8
2. Gurevich, S.M. (1990) *Non-ferrous metal welding guide*. Kiev, Naukova dumka, [in Russian].
3. Bailey, N. (1986) *Welding dissimilar metals*. Cambridge, Woodhead Publ. Ltd.

4. Neulybin, S.D., Belinin, D.S., Kuchev, P.S., Gilev, I.A. (2013) Research plasma surfacing of copper by working of plasma torch on direct and reverse polarity current. *Master's J.*, **2**, 22-27.
5. Radyuk, A.G., Titlyanov, A.E., Strizhakova, T.I. et al. (2008) The influence of aluminum on the nickel and chromium diffusion into copper during the deposition and thermal treatment of gas-thermal coatings. *Russian Journal of Non-ferrous Metals*, **49**, 261–263. DOI:10.3103/S1067821208040093
6. Neulybin, S.D., Belinin, D.S., Terentyev, S.A. (2017) Comparative analysis of wear and corrosion attack resistance of bimetal steel-copper products manufactured by plasma-jet hard-facing with direct and reversed polarity current. *Procedia Eng.*, **206**, 1401-1406. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.652
7. Messler, R.W. (2019) A Practical guide to welding solutions: overcoming technical and material-specific issues. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. DOI:10.1002/9783527818815
8. Akimov, V.A. (2011) *Research and improvement of the technology for manufacturing air lances of blast furnaces by applying aluminum-containing gas-flame coatings with subsequent heat treatment. Cand. tech. sci. diss. abstr.* Moscow, Institut stali i splavov [in Russian].
9. Paton, B.E. (1974) *Technology of the Fusion Electric Welding of Metals and Alloys.* Moscow, Mashinostroenie, [in Russian].
10. Rjabcev, I.A., Senchenkov, I.K., Turyk, Je.V. (2015) *Surfacing. Materials, technologies, mathematical modeling.* Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Slaskiej [in Russian].
11. Gerasimova, A., Devyatyarova, V., Kondratenko, V. (2017) Creation of the wear-resistant layer on narrow walls MNLZ crystallizers with use gas-thermal covering. *Bulletin of Sci. and Practice*, **1**, 32-38.
12. Demidenko, L.Yu., Onatskaya, N.A., Polovinka, V.D. (2014) Effect of temperature of thermomechanical treatment on quality of dissimilar metal joints. *The Paton Welding J.*, **12**, 11-14. DOI:10.15407/tpwj2014.12.03
13. Poleshchuk, M.A., Atroshenko, M.G., Shevtsov, A.V., Puzrin, A.L. (2016) Deposition of protective coatings on copper plates of CCM molds by the method of autovacuum brazing. *Ibid.*, **10**, 37-40. DOI:10.15407/tpwj2016.10.07
14. Koleda, V.N. (2012) Improvement of the technology for submerged-arc welding of copper to steel. *Ibid.*, **3**, 39-43.
15. Wan, X., Liu, X.W., Zhang, M.Y. (2007) Experimental research on ZrO₂ coating for single tuyere of small blast furnace. *Refractories*, **41**, 220-222, 229.
16. Shmorgun, V.G., Slautin, O.V., Evstropov, D.A. et al. (2015) Methods for producing wear-resistant coatings based on titanium cuprides. *Izvestija VGTU*, **12**, 22-28, [in Russian].
17. Portnov, L., Nikitin, L., Bugaev, S., Shchipsyn, V. (2014). Improving the durability of blast-furnace tuyeres. *Metallurgist*, **58**, 488-491. DOI:10.1007/s11015-014-9938-7.
18. Senchenkov, I.K., Chervinko, O.P., Ryabtsev, I.A., Babinets, A.A. (2014) Determination of the service life of hardfaced components under thermal and cyclic loading. *Welding International*, v. 28, **1**, 80-84. DOI:10.1080/09507116.2013.796661
19. Babinets, A.A., Ryabtsev, A.A. (2016) Fatigue life of multi-layer hard-faced specimens. *Ibid.*, v. 30, **4**, 305-309. DOI:10.1080/01431161.2015.1058004
20. Ilyushenko, V.M., Anoshin, V.A., Majdanchuk, T.B., Luki-anchenko, E.P. (2014) Effectiveness of application of new consumables in welding and surfacing of copper and its alloys (Review). *The Paton Welding J.*, **6-7**, 80-83. DOI:10.15407/tpwj2014.06.16
21. Psaras, G.G., Ezhel', A.I. (1985) *For Welder of Non-Ferrous Metals. Reference Book.* Donetsk, Donbass, [in Russian].
22. Nevidomsky, V.A., Krasilnikov, S.G., Panin, A.D., et al. (2003) Experience in welding of copper-steel moulds at NKMZ Company. *The Paton Welding J.*, **8**, 46-48.
23. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.A., Panfilov, A.I., Zhdanov, V.A. (2016) Influence of methods of arc surfacing with flux-cored wire on penetration of base metal and formation of deposited metal. *Ibid.*, **11**, 17-22. DOI:10.15407/tpwj2016.11.03
24. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.A. (2017) Flux-cored wire for wear-resistant surfacing of thin-sheet structures. *Ibid.*, **1**, 54-57. DOI:10.15407/tpwj2017.01.10
25. Pereplyotchikov, E.F. (2004) Plasma-powder cladding of wear- and corrosion-resistant alloys in valve manufacturing. *Ibid.*, **10**, 31-37.
26. Pereplyotchikov, E.F. (2015) Plasma-powder surfacing of nickel and cobalt alloys on copper and its alloys. *Ibid.*, **5-6**, 10-13. DOI:10.15407/tpwj2015.06.02
27. Beljuk, S.I., Samarcev, V.P., Pay, A.G., Gal'chenko N.K. (2006) Electron beam surfacing in the steel industry. *Proceedings II int. seminar «Plasma emission electronics». Respublika Burjatija, Ulan-Udje*, 101-107, [in Russian].
28. Grigorenko, G.M., Adeeva, L.I., Tunik, A.Yu., et al. (2015) Application of friction stir welding method for repair and restoration of worn-out copper plates of mccb moulds. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 55-58. DOI:10.15407/tpwj2015.06.13
29. Massalski, T. B. (2007) *Binary alloy phase diagrams.* Materials Park, Ohio, ASM Inter.
30. Chigarev, V.V., Gavrish, P.A., Vasil'eva, L.V. (2011) Increase of the productivity of welding of cooper with steel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **4/5**, 4-7.
31. 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.

PROBLEMS AND PROSPECTS OF SURFACING COPPER AND COPPER PARTS BY WEAR-RESISTANT LAYERS (Review)

A.A. Babinets¹, I.O. Ryabtsev¹, I.P. Lentyugov¹, I.I. Ryabtsev¹, Yu.V. Demchenko¹, A.I. Panfilov²

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

² Steel Works Company, 32 Sobornosti Str., 50065, Kryvyi Rih, Ukraine. E-mail: a.panfilov@steel-work.net

The prospects for application of the methods of arc and plasma-powder surfacing, in order to increase the crack resistance of copper parts, are shown, proceeding from the results of literature analysis. Selection of promising materials was performed for deposition of copper-resistant layers on copper surfaces by these methods. Comparative evaluation of physico-mechanical properties of copper and the main alloying elements of promising surfacing materials was performed. 31 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: copper surfacing, wear-resistant layer, increase of wear-resistance, copper, dissimilar metals, weldability, fusion zone

Надійшла до редакції 17.03.20

Х Міжнародна конференція
**«Математичне моделювання
 та інформаційні технології в зварюванні
 та споріднених процесах»**
 Україна, Одеса, готель «Аркадія»
 14 – 18 вересня 2020 р.

XXIII Міжнародна конференція
**«НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ та
 МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ»**
 Україна, Одеса, готель «Аркадія»
 14 – 18 вересня 2020 р.