

**Р. Ф. Ліхацький**, аспірант, e-mail: richardlihatskyi@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

## СПЕЦІАЛЬНІ СПЛАВИ ТА КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ МІДІ ТА МЕТОДИ ЇХ ОДЕРЖАННЯ

У статті розглянуто основні проблеми виробництва та використання мідних сплавів і композитів у контексті нових вимог до їх властивостей з огляду на екстремальні умови експлуатації. Значний обсяг цих матеріалів використовується в електротехніці та в якості деталей підшипників вже багато десятиріч, проте сучасний рівень розвитку техніки вимагає ефективних рішень для покращення низки експлуатаційних властивостей міді та сплавів на її основі. Одним із найбільш ефективних сучасних методів вирішення такого роду задач є створення функціональних композиційних матеріалів на основі міді та розробка ефективних технологій їх одержання. Підвищення робочих температур та збереження необхідних механічних властивостей наразі є головними вимогами для міді та її сплавів. Показано, що твердорозчинні та дисперсійнотвердіючі механізми зміцнення цих матеріалів більшою мірою вичерпали себе. Це пов'язано, в основному, зі схильністю зміцнюючих компонентів та фаз розчинятися в матричному матеріалі при високих робочих температурах. Тому головною тенденцією нині є застосування нерозчинних дисперсійних часток, таких як карбіди металів, макс-фази тощо для зміцнення міді та її сплавів. У більшості випадків дані задачі вирішувалися методами порошкової металургії. Це давало можливість гарантованого одержання рівномірного або локального контрольованого розподілу часток у деталях. Тим не менш, дані методи є досить дорогими і не можуть забезпечити виробництво крупногабаритних виробів. Ливарні технології одержання мідних композитів мають свої переваги перед порошковими, що виражається як в більшій технологічній та економічній ефективності, так і в якості металу. Окрім цього, лише ливарні технології здатні забезпечити одержання мідних композитів з ендогенно утвореними нерозчинними сполуками або сплавів монотектичних систем зі структурою замороженої емульсії.

**Ключові слова:** композиційні матеріали на основі міді, монотектичні сплави, структура замороженої емульсії, прогресивні ливарні технології.

Сучасний розвиток електротехнічної та машинобудівної галузей потребує сплавів, що мали б високі параметри електро-, теплопровідності, високі антифрикційні та механічні властивості за різних умов експлуатації.

Мідь та більшість її сплавів мають широке розповсюдження переважно завдяки фізичним та технологічним властивостям. Сплави міді добре деформуються як у гарячому, так і у холодному станах, добре зварюються різними видами зварювання, легко піддаються паянню, мають непогану корозійну стійкість. Серед основних недоліків можна виділити невисокі механічні властивості, досить високу густину, схильність до окислення при підвищених температурах, корозійного розтріскування та «водневої хвороби» [1].

Чиста мідь та низьколеговані сплави з високою електропровідністю широко використовують в електротехніці. Велика кількість міді витрачається на дроти високовольтних ліній електропередач та повітряних ліній зв'язку. З мідних сплавів виготовляють колекторні шини для електромашин, струмопідвідні шини, контактори тощо. Висока теплопровідність міді зумовила її застосування в якості різного роду деталей теплообмінників, конструкціях печей спеціальної електрометалургії для плавки активних і тугоплавких металів. З міді виготовляють також водоохолоджувані виливниці, піддони, кристалізатори тощо. Експлуатаційні характеристики чистої міді є досить обмеженими з огляду на її досить низьку міцність та обернено пропорційну залежність цієї характеристики від температури. Через це навіть в електротехніці, де

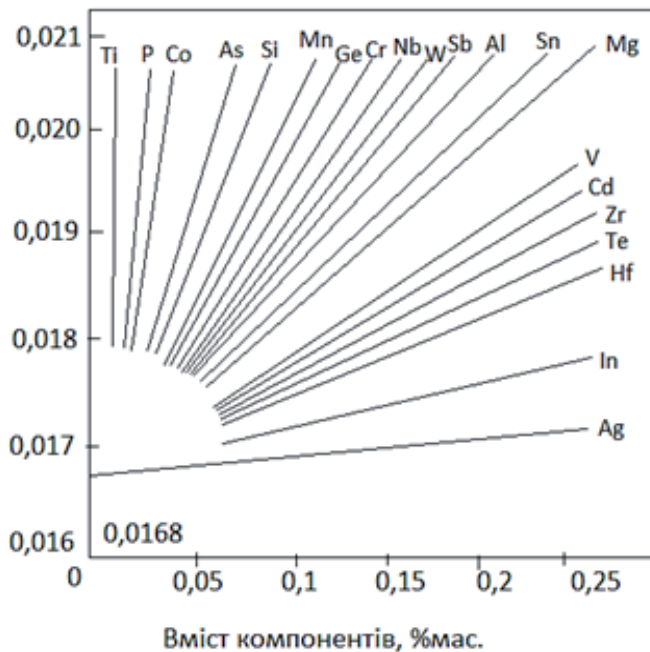
## Нові литі матеріали

необхідно використовувати максимально чисту мідь, існує компроміс використання сплавів.

У більшості випадків сплави міді використовують саме завдяки своїй хорошій електропровідності. Низьколеговані бронзи високої електро- і теплопровідності – найбільш важлива група провідникових сплавів на основі міді. Ці сплави поєднують у собі такі властивості (електропровідність, висока міцність та жаростійкість), які не можуть бути отримані в матеріалах на іншій металевій основі [2] і мають більш високу міцність і твердість порівняно з міддю, високий рівень жаростійкості.

Низьколегованими мідними сплавами називають сплави з електропровідністю понад 20 МСм/м при 20 °С, що відповідає питомому електроопору 0,05 мкОм·м і питомій теплопровідності 145 Вт/(м·К) [3]. Для створення сплавів високої електропровідності мідь необхідно легувати лише елементами, що покращують параметри міцності сплаву без суттєвого зниження електропровідності. Дані рисунку показують, що в найменшій мірі знижують електропровідність міді срібло та кадмій. Саме ці елементи використовували при створенні провідникових бронз БрСр0,1 і БрКд1 з твердорозчинним зміцненням. Вони міцніші міді і мають найвищу електропровідність серед провідникових низьколегованих мідних сплавів. Низьколеговані мідні сплави з твердорозчинним зміцненням за своєю природою близькі до мікролегованих провідникових мідних сплавів. Їх поєднує те, що єдиним методом зміцнення таких груп сплавів є холодна деформація.

$\rho$ , мкОм·м



Вплив домішок і малих концентрацій легуючих елементів на питомий опір міді високої чистоти [4]

Основною ж відмінністю цих груп сплавів є той факт, що низьколеговані сплави з твердорозчинним зміцненням не містять більше двох компонентів, так як у даному випадку це не підвищуватиме, а знижуватиме електропровідність. Мікролеговані сплави, в свою чергу, можуть містити більшу кількість складових компонентів, кожен з яких вноситиме свій вклад у підвищення температури початку рекристалізації і сприятиме підвищенню робочої температури провідникового матеріалу.

Низьколеговані бронзи високої електро- та теплопровідності за характером зміцнення діляться на такі групи: сплави, що зміцнюються холодною деформацією (термічно незміцнювальні сплави); термічно зміцнювальні дисперсійно-твердіючі сплави; дисперсно-зміцнені сплави.

До групи термічно незміцнювальних сплавів відносяться провідникові бронзи  $\text{BrSr0,1}$ ,  $\text{BrKd1}$ ,  $\text{BrO0,15}$  і  $\text{BrMg0,3}$  з твердорозчинним зміцненням. Всі ці сплави мають найвищу електропровідність серед низьколегованих провідникових мідних сплавів. При холодній деформації їх електропровідність падає на 1–5 %.

Розчинне зміцнення для сплавів високої електро- та теплопровідності не матиме вагомих результатів. Високолеговані сплави – тверді розчини на основі міді мають низькі значення електро- й теплопровідності, так як введення більшості легуючих елементів в кількостях, достатніх для зміцнення міді, значно знижує ці характеристики. Саме тому верхня межа при створенні провідникових сплавів обмежується 3–5 % мас. легуючих елементів.

У цьому випадку сплави отримують звичайними металургійними методами: виливають масивні зливки та отримують з них деформовані напівфабрикати. Ефект зміцнення таких сплавів створюється за рахунок гартування з наступним старінням чи в результаті використання різноманітних режимів термомеханічної обробки. Системи легування таких сплавів вибирають такими, щоб елементи мали змінну розчинність в міді та щоб значна розчинність при високих температурах зменшувалась практично до нуля при зниженні її до нормальної. У цьому разі матриця такого сплаву виглядає практично як чиста мідь з високою електропровідністю і другою фазою з меншою електропровідністю, кількість якої зазвичай незначна [5].

Враховуючи неможливість вагомого механічного зміцнення мідних сплавів легуванням без сильного зниження електро- та теплопровідності, використовують деякі інші методи зміцнення. Холодною деформацією (прокатка, волочіння) можна подвоїти міцнісні властивості міді. Електропровідність при цьому зменшуватиметься повільно. Однак наклеп від пластичної деформації можна використовувати лише в умовах роботи при незначних температурах: мідь швидко втрачає міцність при нагріванні понад 150–200 °С внаслідок рекристалізації. Більш ефективним буде дисперсне зміцнення сплавів за рахунок старіння та зміцнення міді дисперсними нанорозмірними частинками.

У такому разі в практично чисту мідь, застосовуючи специфічні технологічні процеси, вводять ультратонкі нанорозмірні тугоплавкі частинки, що практично не взаємодіють з матрицею і стабільні аж до температур плавлення самої міді. Ці матеріали відрізняються винятково високою жаростійкістю та не впливають на електропровідність міді.

Серед інших властивостей мідних сплавів, що формують, в певній мірі, окрему галузь їх використання, варто виділити високі антифрикційні властивості. Розглянемо детальніше *антифрикційні сплави міді* на прикладі найбільш поширених сплавів серед них – свинцевих бронз та бабітів.

Свинцеві бронзи мають одні з найкращих антифрикційних властивостей серед мідних сплавів, а тому широко використовуються для виготовлення підшипників ковзання. До матеріалів підшипників висувають наступні вимоги: добра початкова «припрацьовуваність»; низький коефіцієнт тертя; здатність працювати при досить значних навантаженнях, швидкостях обертання і температурах без видавлювання, розм'якшення, викрашування; здатність формувати самозмащувальні чи легко притиральні колоїдні продукти стирання; більш низька, ніж в шийки валу, твердість; висока теплопровідність, достатня для інтенсивного відводу тепла від зони тертя; висока ударна в'язкість у випадку роботи при ударних навантаженнях.

Підшипникові матеріали повинні бути дешевими. Ідеальна структура антифрикційного сплаву – пластинчаста основа, в якій розташовані тверді включення. Такі тверді кристали зумовлюють малий коефіцієнт тертя, незначне зношування і сприймають навантаження, а пластинчаста основа забезпечує до-

бру «припрацьовуваність» та пом'якшення ударів. Найбільш хороші умови роботи підшипників ковзання спостерігаються при дрібнозернистій однорідній структурі в сплаві. Класичну структуру підшипникового матеріалу має бронза БрСН60-2,5.

Свинцеві бронзи дуже схильні до ліквідації за питомою вагою. Для боротьби з нею використовують значні швидкості охолодження чи вводять додаткові легуючі елементи. Для широко поширеної свинцевої бронзи БрС30 не характерна класична структура підшипника. Свинець не формує в ній пластичну матрицю, а присутній у вигляді включень всередині міді. Однак ця бронза однаково має високі антифрикційні властивості, так як мідь сама достатньо пластична, щоб забезпечувати хорошу «припрацьовуваність» [6].

Сплав мідь-свинець також можна одержувати в процесі твердо-рідкої взаємодії (контактне легування). Такий сплав може містити до 30 % свинцю та буде мати структуру з дисперсними сферичними включеннями свинцю (діаметром 1–6 мкм), рівномірно розподіленими в мідному каркасі [7].

Варто зазначити, що існує багато інших антифрикційних сплавів на основі міді, окрім свинцевих бронз. Наприклад, одним з напрямків створення нових підшипників із заданими покращеними експлуатаційними властивостями при одночасній економії дефіцитних металів та сплавів є виготовлення і використання біметалевих шаруватих композитів на основі міді. При цьому основний шар біметалевих шаруватих композитів роблять зі сталі чи схожих економічно вигідних матеріалів, що надають підшипнику достатньої механічної міцності, а плакувальний шар представлено антифрикційним сплавом міді [8–10]. Подальший розвиток композиційних матеріалів на основі мідних сплавів дозволить знайти нові антифрикційні сплави з кращими характеристиками міцності та меншими коефіцієнтами зношування при вищій жаростійкості сплаву.

Є досить велика кількість способів покращення властивостей мідних сплавів. Серед них можна виділити як різні види термічної обробки, так і мікролегування або легування. Останнім часом все більшого поширення набувають методи, що не потребують значних витрат легуючих компонентів чи складних технологій – *зміцнення дисперсними частинками*. Оскільки ці частинки можуть відрізнитись за хімічним складом, розміром, по-різному розподілятися в об'ємі металу з неоднаковою щільністю – це створює широкий спектр можливостей для одержання матеріалів на основі міді із наперед заданими властивостями. Вплив дисперсного зміцнення за рахунок ендогенних або екзогенних дисперсних частинок на властивості мідних сплавів детально відображено в роботах [11–15].

Наразі найбільш поширеними на практиці способами створення матеріалів з дисперсним зміцненням є нижченаведені.

*Дисперснотвердіючі сплави.* Найбільш поширеним способом створення сплавів з дисперсійним зміцненням є формування дисперсних зміцнюючих фаз у результаті розпаду перенасиченого твердого розчину при старінні. У даних сплавах фази, що відокремлюються від матриці, можуть бути когерентними, напівкогерентними чи некогерентними залежно від стадії розпаду твердого розчину [11, 12].

Як відомо з аналізу механізмів перерізу когерентними виділеннями і обтікання некогерентних частинок ковзаючими дислокаціями, дисперсійне зміцнення в обох випадках буде вищим, якщо більшою буде об'ємна частка виділень. Рівень зміцнення при старінні визначається не лише складом і будовою зміцнюючих фаз, а і термодинамічними та кінетичними умовами їх утворення. Найбільш ефективним дисперсійне зміцнення буде спостерігатись у тому випадку, коли зміцнююча фаза здатна розчинюватись у матриці з наступним виділенням у дисперсному вигляді і збереженні дисперсності в процесі нагріву й охолодження. Основною проблемою є підбір таких зміцнюючих фаз, які б забезпечили одночасне виконання цих взаємовиключних вимог, оскільки в фазах, що схильні до дифузійного розчинення, як правило, спостерігається і висока швидкість дифузійних процесів коагуляції. Наприклад, в якості зміцнюючих дисперсних фаз у сталях і сплавах використовують переважно карбіди, нітриди, карбонітриди перехідних металів, макс-фази та інтерметалідні сполуки [13–15].

*Композиційні матеріали, отримані шляхом порошкової металургії.* Широке використання в якості зміцнюючих частинок термодинамічно стабільних високоміцних фаз ускладнюється через їх малу розчинність в металевій матриці. Ці обмеження можна обійти шляхом застосування технологій порошкової металургії.

Основною проблемою порошкової металургії, що ґрунтується на процесах перемішування металевих порошоків, їх наступним стискуванням та спіканням, є складнощі в забезпеченні рівномірного розподілу оксидних часток. Технології порошкової металургії зазвичай дозволяють досягти рівномірного розподілу лише 2–4 % дрібних частинок зміцнюючих оксидів [16, 17]. Крім того, мінімальна відстань між частинками не може бути меншою за розмір самої частинки металевого порошку.

*Внутрішнє насичення елементами впровадження.* Отримання інертних дисперсних частинок в жароміцних сплавах можливо досягнути за допомогою хіміко-термічної обробки, а саме методами внутрішнього насичення сплавів елементами, які утворюють фази впровадження. До таких методів належать внутрішнє окиснення, внутрішня цементація та внутрішнє азотування.

Внутрішньому окисненню зазвичай піддають сплави, матриці яких мають незначну спорідненість до кисню (Cu, Ag, Ni, Mo, W), а в якості легуючих елементів використовують метали зі значною спорідненістю до кисню (Ti, Zr, Hf, Th, Al, Si), що формують стійкі оксиди. Технологія внутрішнього окиснення найчастіше передбачає процес окиснення порошоків подвійних сплавів матричного металу і легуючого елемента з наступним пресуванням і спіканням. Розміри частинок та їх розподіл залежатимуть від термодинамічної стабільності оксидів.

Процес внутрішньої цементації аналогічний технології внутрішнього окиснення. Зазвичай міцнісні характеристики отриманих сплавів вищі, ніж у сплавів, зміцнених технологіями порошкової металургії чи отриманих шляхом внутрішнього окиснення. Головна проблема процесу полягає в складності регулювання структури сплаву, в якому спостерігається нерівномірний розподіл карбідних часток, наявність частинок великих розмірів (до 4 мкм) в поєднанні із зонами, вільними від таких включень.

Під внутрішнім азотуванням розуміють процес отримання в сплавах дифузійного шару, що складатиметься з дисперсних частинок нітридних фаз, розподілених в матриці, за відсутності на поверхні традиційної для класичного азотування нітридної зони. Таким чином, при внутрішньому азотуванні реалізується як дисперсне зміцнення нітридами, так і твердорозчинне зміцнення матриці азотом [17].

Існують також інші методи дисперсного зміцнення сплавів, проте вони не так широко використовуються в промисловості та потребують більш детального вивчення.

Потреба в підвищенні механічних, електротехнічних і триботехнічних властивостей мідних сплавів потребує впровадження новітніх перспективних принципів створення таких сплавів.

*Створення сплавів на основі монотектичних систем, діаграми стану яких характеризуються наявністю області двофазного рідкого стану, дає можливість реалізувати принципово нову схему одержання зміцнених сплавів, здатних зберігати високі показники механічних властивостей при підвищених температурах в поєднанні з відносно хорошими спеціальними властивостями (наприклад, тепло- та електропровідність).* Так як зміцнююча фаза формується саме в рідкому стані, бажано досягти переходу розплаву в стан дрібнодисперсної емульсії з наступною фіксацією такої структури в твердому стані за рахунок швидкої кристалізації.

Для мідних сплавів існує велика кількість варіантів другого компоненту, з яким би мідь мала монотектичну подвійну діаграму стану. Такими металами є Mo, Pb, Re, Ta, U, V, W, Cr. Відповідно, існують великі можливості щодо створення різноманітних сплавів таких систем. Структурна особливість композиційних матеріалів монотектичних систем на основі міді полягає в тому, що складові фази фактично не взаємодіють один з одним, що запобігає утворенню сторонніх фаз чи включень, які могли б змінити властивості основного компоненту. Через особливості процесу кристалізації

таких систем дуже вірогідно, що кристалізовані нерозчинені включення матимуть сприятливу будову, яка підвищуватиме механічні властивості сплаву в цілому.

На сьогодні напрям створення мідних сплавів монотектичних систем активно розвивається. Так, наприклад, існує досвід створення подібних литих композитів з використанням вкраплень чавуну [18].

Створення сплавів зі структурою «замороженої емульсії» може стати перспективним як для задоволення потреб електротехнічної галузі, так і для розробки вкладишів пар тертя. Ще й досі розвиток цього напрямку в аспекті одержання якісних литих виробів стримується відсутністю відповідних технологій, які могли б забезпечити одержання розплаву монотектичних систем на основі міді з гомогенною будовою, тобто забезпечити перегрів вище монотектичної області. Наразі потенційно придатною технологією в цьому плані може виступати електронно-променева гарнісажна плавка.

### Список літератури

1. Горбатенко В. П. Кольорові метали та сплави: підручник для вищих навчальних закладів. / В.П. Горбатенко, В. В. Горбатенко. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – 300 с.
2. Николаев А. К. Низколегированные медные сплавы. Особенности составов и технологии производства // Цветные металлы. – 2001. – № 5 – С. 84–88.
3. Николаев А. К. Хромовые бронзы / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг. – М.: Металлургия, 1983. – 176 с.
4. Николаев А. К. Сплавы для электродов контактной сварки / А. К. Николаев, В. М. Розенберг. – М.: Металлургия, 1978. – 96 с.
5. Колачев Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б. А. Колачев, В. Н. Елагин, В. А. Ливанов. – М.: МИСиС, 2001. – 416 с.
6. Филиппов М. А. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении: учебное пособие: в 2 т. Т. II. Цветные металлы и сплавы / М. А. Филиппов, В. Р. Бараз, М. А. Гервасьев. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 236 с.
7. Авраамов Ю. С. Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии (теория, технология, структура и свойства): Монография / Ю. С. Авраамов, А. Д. Шляпин. – М.: Интерконтакт наука, 2002. – 172 с.
8. Затуловский С. С. Биметаллические композиционные материалы антифрикционного назначения / С. С. Затуловский, А. С. Затуловский, А. В. Косинская, Б. Р. Тракшинский // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2010. – № 3(20) – С. 123–127.
9. Щерецкий В. А. Новые литые композиты на основе несмешивающихся компонентов / В. А. Щерецкий, А. С. Затуловский, Е. А. Набока // Литейное производство. – 2018. – № 9. – С. 14–15.
10. Затуловский А. С. Исследование зоны взаимодействия двухслойных композитов Fe–Cu на основе медных сплавов / А. С. Затуловский, В. А. Щерецкий // Материалы конференции «Литье. Металлургия». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – С. 96–97.
11. Степанчук А. М. Отримання порошків дисперснозміцненої міді / А. М. Степанчук, О. С. Богатов, М. Б. Шевчук, Н. Ф. Пашковець // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк. – 2010. – С. 188–195.
12. Христенко В. В. Новые композиционные сплавы на основе меди и технологические параметры получения литых заготовок / В. В. Христенко, Б. А. Кириевский // Материалы VII семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОГПУ, 2000. – С. 8.
13. Кириевский Б. А. Особенности получения литейных сплавов со структурой замороженной эмульсии / Б. А. Кириевский, В. А. Середенко, Е. В. Середенко, В. В. Христенко // Металл и литье Украины. – 2001. – № 12. – С. 3–5.
14. Логинов Ю. Н. Медь и деформируемые медные сплавы: учебное пособие. 2-е изд. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 136 с.
15. Кириевский Б. А. Новые дисперсно-упрочненные бронзы и технология получения / Б. А. Кириевский, Л. Н. Трубоченко // Процессы литья. – 2004. – № 4 – С.61–65.
16. Берент В. Я. Материалы и свойства электрических контактов в устойчивых железнодорожного транспорта. – М.: Интекст, 2005. – 408 с.
17. Приходько В. М. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий / В. М. Приходько., Л. Г. Петрова, О. В. Чудина. – М.: Машиностроение, 2003. – 384 с.

18. *Христенко В. В., Ушкалова О. В., Трубаченко Л. Н.* Зносостійкі сплави системи (Fe–Cr–C) з поліпшеними властивостями // Матеріали науково-практичної виставки-конференції «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология», 12 – 14 грудня 2011.– К.: ФТІМС НАН України. – С. 293–294.

Поступила 06.02.2020

### References

1. *Gorbatenko, V. P., Gorbatenko, V. V.* (2012) Non-ferrous metals and alloys: a textbook for higher education institutions. Donetsk: DNTU, 300 p. [in Ukrainian].
2. *Nikolaev, A. K.* (2001) Low alloyed copper alloys. Features of compositions and production technology. Non-ferrous metals, no. 5, pp. 84-88 [in Russian].
3. *Nikolaev, A. K., Novikov, A. I., Rozenberg, V. M.* (1983) Chrome bronzes. Moscow: Metallurgy, 176 p. [in Russian].
4. *Nikolaev, A. K., Rozenberg, V. M.* (1978) Alloys for resistance welding electrodes. Moscow: Metallurgy, 96 p. [in Russian].
5. *Kolachev, B. A., Elagin, V. N., Livanov, V. A.* (2001) Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys. Moscow: MISIS, 416 p. [in Russian].
6. *Filippov, M. A., Barash, V. R., Hervasev, M. A.* (2013) Methodology for the selection of metal alloys and hardening technologies in mechanical engineering: a training manual: in 2 volumes. T. II. Non-ferrous metals and alloys. Yekaterinburg: Publishing House Ural. University, 236 p. [in Russian].
7. *Avraamov, Ju. S., Schlapin, A. D.* (2002) Alloys based on systems with limited solubility in the liquid state (theory, technology, structure and properties): Monograph. Moscow: Intercontact Science, 172 p. [in Russian].
8. *Zatulovsky, S. S., Zatulovsky, A. S., Kosinskaya, A. V., Trakshinsky, B. R.* (2010) Bimetallic composite materials for antifriction purposes. VISNIK Donbass State Power Engineering Academy, no. 3(20), pp. 123-127 [in Russian].
9. *Scheretsky, V. A., Zatulovsky, A. S., Naboka, E. A.* (2018) New cast composites based on immiscible components. Foundry, no. 9. pp. 14-15 [in Russian].
10. *Zatulovsky, A. S., Scheretsky, V. A.* (2016) Investigation of the interaction zone of Fe-Cu two-layer composites based on copper alloys. Materials of the conference "Casting. Metallurgy". Kharkov: NTU "KhPI", pp. 96-97 [in Russian].
11. *Stepanchuk, A. M., Bogatov, O. S., Shevchuk, M. B., Pashkovets, N. F.* (2010) Obtaining powders of dispersed hardened copper. Intercollegiate collection "SCIENTIFIC NOTES". Lutsk, pp. 188-195 [in Ukrainian].
12. *Khristenko, V. V., Kirievsky, B. A.* (2000) New composite alloys based on copper and technological parameters for producing cast billets. Materials of the VII workshop "Modeling in Applied Scientific Research". Odessa: OGPU, pp. 8 [in Russian].
13. *Kirievsky, B. A., Seredenko, V. A., Seredenko, E. V., Khristenko, V. V.* (2001) Features of producing cast alloys with the structure of a frozen emulsion. Metal and Casting of Ukraine, no. 12. pp. 3-5 [in Russian].
14. *Loginov, Yu. N.* (2006) Copper and wrought copper alloys: a training manual. 2nd ed. Ekaterinburg: GOU VPO, 136 p. [in Russian].
15. *Kirievsky, B. A., Trubachenko, L. N.* (2004) New dispersion-hardened bronzes and production technology. Casting processes, no. 4. pp. 61-65 [in Russian].
16. *Berent, V. Ya.* (2005) Materials and properties of electrical contacts in railway devices. Moscow: Intext, 408 p. [in Russian].
17. *Prikhodko, V. M., Petrova, L. G., Chudina, O. V.* (2003) Metallophysical foundations for the development of reinforcing technologies. Moscow: Engineering, 384 p. [in Russian].
18. *Khristenko, V. V., Ushkalova, O. V., Trubatchenko, L. N.* Wear-resistant (Fe–Cr–C)-alloys with approved properties // Materials of scientific and practical conference-exposition "Foundry: technologies, materials, equipment, economy and ecology", 12-14 december 2011. Kyiv: PTIMA NAS of Ukraine, pp. 293-294 [in Russian].

Received 06.02.2020

**Р. Ф. Лихацкий**, аспирант, e-mail: richardlihatskyi@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины (Киев, Украина)

### **СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПЛАВЫ И КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ И МЕТОДЫ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ**

*В статье рассмотрены основные проблемы производства и использования медных сплавов и композитов в контексте современных требований к их свойствам, учитывая экстремальные условия эксплуатации. Большое количество этих материалов используется в электротехнике и в качестве деталей подшипников уже много десятилетий, но современный уровень развития техники требует эффективных решений для улучшения ряда эксплуатационных свойств меди и сплавов на ее основе. Одним из наиболее эффективных современных методов решения такого рода задач есть создание функциональных композитных материалов на основе меди и разработка эффективных технологий их получения. Повышение рабочих температуры и сохранение необходимых механических свойств – главные требования для меди и ее сплавов в данный момент. Показано, что твердорастворимые и дисперсионотвердеющие механизмы упрочнения этих материалов, в большей мере, исчерпали себя. Это связано, преимущественно, со склонностью упрочняющих компонентов и фаз растворяться в матрице при высоких рабочих температурах. Поэтому главной тенденцией сейчас является использование нерастворимых дисперсионных частиц, таких как карбиды металлов, макс-фазы и другие для упрочнения меди и ее сплавов. В большинстве случаев эти задачи решались методами порошковой металлургии. Это давало возможность получения равномерного или локального контролируемого распределения частиц в деталях. Несмотря на это, такие методы есть довольно дорогими и не могут обеспечить производство крупногабаритных изделий. Литейные технологии получения медных композитов имеют свои преимущества над порошковыми, что проявляется как в большей технологической и экономической эффективности, так и в вопросах качества металла. Кроме этого, только литейные технологии способны обеспечить получение медных композитов с эндогенно образованными нерастворимыми соединениями или сплавов монотектических систем со структурой замороженной эмульсии.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы на основе меди, монотектические сплавы, структура замороженной эмульсии, прогрессивные литейные технологии.

**R. F. Likhatskyi**, Postgraduate Student, e-mail: richardlihatskyi@gmail.com

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

### **SPECIAL COPPER-BASED ALLOYS AND COMPOSITES AND METHODS OF THEIR PRODUCTION**

*The article considers the main production problems and the use of copper alloys and composites in the context of modern requirements for their properties, taking into account the extreme operating conditions. A large number of these materials have been used in electrical engineering and as bearing parts for many decades, but the current level of technological development requires effective solutions to improve a number of operational properties of copper and alloys based on it. One of the most effective modern methods for solving such problems is the creation of functional copper-based composite materials and the development of effective technologies for their preparation. Increasing operating temperatures and maintaining the necessary mechanical properties are the main requirements for copper and its alloys at the moment. It was shown that the solid-soluble and dispersion hardening mechanisms of hardening of these materials, to a greater extent, have exhausted themselves. This is mainly due to the tendency of hardening components and phases to dissolve in the matrix at high operating temperatures. Therefore, the main trend now is the use of insoluble dispersion particles, such as metal carbides, max phases, etc. for hardening copper and its alloys. In most cases, these problems were solved by powder metallurgy methods. This made it possible to obtain a uniform or local controlled distribution of particles in the parts. Despite this, such methods are quite expensive and cannot provide the production of large-sized products. Foundry technologies for producing copper composites have their advantages over powder ones, which is manifested both in greater technological and economic efficiency, and in of metal quality. In addition, only foundry technologies are capable of producing copper composites with endogenously formed insoluble compounds, or alloys of monotectic systems with the structure of a frozen emulsion.*

**Keywords:** copper-based composite materials, monotectic alloys, structure of the frozen emulsion, advanced casting technologies.