

Основні принципи розробки монетних сплавів із заданою електропровідністю

Basic principles of development of coinage alloys with the specified electrical conductivity

Проведено аналіз наукових праць і досліджено вплив легуючих елементів на електропровідність міді та латуней. Показано можливість керування цією характеристикою шляхом легування алюмінієм, оловом, марганцем, залізом, нікелем. На основі системи Cu-Zn розроблено та випробувано перспективні монетні сплави із заданою електропровідністю.

Having analyzed studies the authors investigated the influence of alloying elements on the electrical conductivity of copper and brasses. They showed the possibility of regulation of this feature by alloying these metals with aluminum, tin, manganese, iron, and nickel. There were developed and tested future-oriented coinage alloys with the required electrical conductivity on the basis of the Cu-Zn system.

Ключові слова: електропровідність, легування, латуні, монетні сплави.

Key words: electrical conductivity, alloying, brasses, coinage alloys.

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ЯК ФУНКЦІОНАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МОНЕТНИХ СПЛАВІВ

Монетні сплави як різновид функціональних матеріалів повинні задовольняти певні вимоги щодо комплексу їхніх характеристик. Для зручності властивості монетних сплавів можна умовно поділити на *технологічні*, які зумовлюють можливість виготовлення монет, *функціональні*, які гарантують ефективне використання монет за призначенням, та *експлуатаційні*, які забезпечують збереження функціональних властивостей монет під час тривалого обігу. Серед актуальних для сучасних монетних систем вимог щодо функціональних властивостей особливе значення має забезпечення можливості не лише візуальної, а й автоматичної ідентифікації монет, оскільки її відсутність унеможливує роботу торговельних автоматів, а також устаткування для сортування та підрахунку монет у банках.

Традиційно монети ідентифікують шляхом визначення їх маси та розмірів (товщини і діаметру), але для надійнішої ідентифікації, а також відокремлення підробок поряд з масою та геометричними параметрами монет усе частіше використовується електропровідність сплаву, з якого їх виготовлено [1–3]. У цьому випадку електропровідність монетного сплаву повинна мати чітко визначене значення з жорсткою регламентацією припустимого відхи-

лення від номінальної величини. Наприклад, для євромонет рекомендована межа відхилення електропровідності становить $\pm 2.5\%$ від номінальної, при цьому припустима кількість монет поза вказаним діапазоном обмежена трьома одиницями на мільйон.

Таким чином, електропровідність можна вважати однією з головних функціональних характеристик сучасного монетного сплаву, якій приділяється особлива увага при його розробці. Але досягнення в монетному сплаві певного значення електропровідності не повинно здійснюватися за рахунок відчутного погіршення інших функціональних, а також технологічних і експлуатаційних властивостей, таких як зовнішній вигляд, зносостійкість, корозійна стійкість, пластичність тощо. Отже, регулювання електропровідності проводиться в суворому узгодженні з впливом на інші властивості. Тому розробка сплаву із заданою електропровідністю є комплексною задачею, яка потребує проведення великого обсягу різноманітних досліджень.

Поряд із загальноновживаною одиницею для вимірювання електропровідності (См/м) отримав поширення також Міжнародний стандарт відпаленої міді IACS (International Annealed Copper Standard), згідно з яким електропровідність матеріалів виражається у відсотках від електропровідності чистої міді у відпаленому стані, тобто електропровідність міді, яка становить 58 МСм/м, взято за 100% IACS, отже, електропровідність в 1% IACS дорівнює 0.58 МСм/м.

ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ СПЛАВІВ

У кінцевому підсумку властивості сплаву визначаються природою компонентів, які входять до його складу. Високою електропровідністю характеризуються перехідні метали з гранецентрованою кристалічною решіткою (Ag, Cu, Al, Au), а високою механічною міцністю – метали і сплави з низькою енергією дефектів упаковки. Утворення твердого розчину часто призводить до підвищення міцності сплавів та зменшення їхньої електропровідності. Отже, легування сплавів, яке супроводжується утворенням твердих розчинів, може використовуватись як засіб зниження електропровідності за одночасного зміцнення сплаву. Якщо матеріал потрібно зміцнити без суттєвого зменшення електропровідності, використовують такі легуючі елементи, які не розчиняються в основному металі та утворюють інтерметаліди.

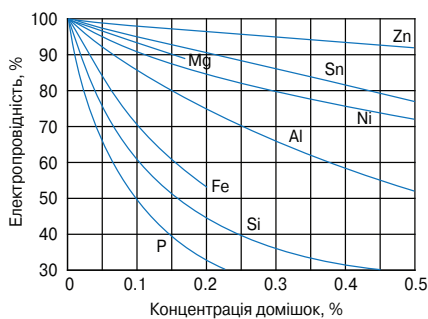
Регулювання електропровідності може здійснюватись і без зміни хімічного стану (пластична деформація, термічна обробка) або з незначною зміною хімічного складу в межах однієї марки сплаву (модифікування). Механізм дії цих факторів полягає у зміні фазового складу, морфології окремих фаз та інших структурних параметрів (розміру зерна тощо).

Найбільшого поширення серед монетних сплавів набули сплави на основі міді (сплави типу нейзильбер, мельхіор, латуні та бронзи). На сьогодні

частка цих сплавів у загальному монетному виробництві становить близько двох третин [4]. Таке широке застосування мідних сплавів для карбування монет пояснюється вдалими сполученнями їхніх властивостей та різноманітним кольором – від білого до червоно-коричневого [1; 4].

Мідь, метал-основа більшості сучасних монетних сплавів, характеризується високою електропровідністю, і практично всі елементи, що до неї додаються, більшою або меншою мірою цю електропровідність знижують [5]. Деякі елементи суттєво погіршують електропровідність міді навіть у концентраціях на рівні домішок (див. графік 1 [6]). Така тенденція в цілому зберігається і стосовно сплавів на її основі, що зумовлює зниження електропровідності мідних сплавів при їх легуванні. Але в окремих випадках зниження електропровідності не відбувається. Так, залізо, нікель, кобальт, кремній і фосфор у сплавах на основі міді після спеціальної термічної оброб-

Графік 1. Зміна питомої електропровідності міді залежно від концентрації домішок



Джерело: [6].

ки можуть утворювати відповідні інтерметаліди, що призводить до підвищення міцності сплавів без зміни електропровідності.

Поліпшення механічних властивостей за рахунок модифікування сплавів, тобто введення в рідкий метал невеликої кількості спеціальних хімічних елементів (La, Ce, Pr, Nd, Ti, Zr, Mg, Ca, B, Y), зазвичай супроводжується зниженням електропровідності. Подрібнення структури сплаву під дією модифікатора означає збільшення протяжності й кількості міжзеренних границь, які перешкоджають руху електронів, що погіршує електропровідність. Типовим прикладом такого модифікатора є титан: обробка мідних сплавів із застосуванням цього елемента дає змогу ефективно подрібнювати зерна, що призводить до відчутного зниження електропровідності. Але зв'язок деяких елементів (наприклад, Be, Si) з перехідни-

ми елементами (наприклад, Ni, Co) може спричинити підвищення електропровідності мідних сплавів за рахунок дисперсійного тверднення надлишкових тугоплавких фаз (CoBe, NiBe, NiSi, CoSi) під час термообробки [7].

Поряд з модифікуванням для подрібнення зеренної структури та підвищення міцності мідних сплавів використовують механічні методи – різноманітні способи інтенсивної пластичної деформації, яка призводить до збільшення міцності металу без суттєвої втрати електропровідності [8–12]. Але через підвищення розсіювання вільних електронів на дефектах решітки (границях зерен, дислокаціях) електропровідність усе-таки, як правило, знижується, і для її відновлення деформований метал потрібно відпалювати.

Поліпшення механічних властивостей зі збереженням заданої електропровідності може досягатися шляхом часткової або повної заміни одних легуючих елементів іншими. Як альтернативу традиційно використовуваним сплавам систем Cu-Sn, Cu-Al та Cu-Zn запропоновано експериментальні сплави систем Cu-Mg, Cu-Al-Mg [13]. Спеціальна обробка сплавів призводить до пересичення твердого розчину магнієм, що забезпечує досягнення вищих показників умовної межі плинності зі збереженням потрібної електропровідності.

Прикладом успішної часткової заміни легуючих елементів можна вважати розробку економічно легованих сплавів Cu-Zn-Ni-Fe і Cu-Zn-Ni-Fe-Cr, колір і електропровідність яких відповідали монетному сплаву Cu-25Ni (мельхіор) [3]. Основним принципом цієї розробки було компенсування очікуваного зниження міцності й електричного опору внаслідок зменшення вмісту нікелю шляхом додавання цинку, заліза та хрому. Відпалені та холоднокатані листи зі сплавів Cu-18.5Zn-15Ni-1.5Fe, Cu-18.5Zn-15Ni-1.5Fe-0.2Cr, Cu-25.5Zn-12Ni-2.0Fe і Cu-25.5Zn-12Ni-2.0Fe-0.26Cr мали електропровідність у межах від 5.6 до 5.8% IACS, яка близька до електропровідності сплаву Cu-5Ni (5.7% IACS).

Актуальність робіт, пов'язаних із частковим заміщенням у сплавах нікелю іншими компонентами, зумовлена, з одного боку, його великою вартістю, а з другого – здатністю викликати у деяких людей алергічні реакції [14]. І хоча в економічно легованих сплавах систем Cu-Zn-Ni-Fe і Cu-Zn-Ni-Fe-Cr вдається дещо зменшити вміст нікелю,

його частка залишається досить значною, що не вирішує повною мірою проблеми високої вартості сплавів і чутливості до нікелю окремих людей. Позбавлені цих недоліків сплави системи Cu-Zn, яка є основою найбільш використовуваної групи мідних сплавів – латуней. Розрізняють подвійні або прості латуні, які містять лише мідь та цинк, а також складні або леговані, до складу яких, окрім міді та цинку, входять також інші елементи.

Переважає більшість відомих латуней знаходиться в одно- або двофазному стані. Фазовий склад подвійних латуней визначається вмістом цинку. При перевищенні його частки 39% α -фаза, що має гранецентровану кубічну решітку ($a = 3.61 \text{ \AA}$), частково переходить у β -фазу з об'ємноцентрованою решіткою ($a = 2.94 \text{ \AA}$) [5]. Перерозподіл атомів у вузлах кристалічної решітки є також чинником зміни електропровідності. В системі Cu-Zn залежно від співвідношення міді та цинку можуть бути наявні α -, β -(β' -), γ -, ϵ -фази, які мають різні електронні конфігурації, що зумовлює і різні показники електропровідності [6; 15]. Для поліпшення властивостей до латуней вводять Mg, Sn, Ni, Pb, Si, Fe, Al, Mn та інші легуючі елементи. В легованих латунях фазовий склад визначається не лише вмістом цинку, а й наявністю та концентрацією додаткових елементів [16].

До сплавів з великим вмістом цинку і нікелю належать сплави типу нейзильбер. За структурою та властивостями ці сплави системи Cu-Ni-Zn займають проміжне місце між мідно-нікелевими сплавами і латунями. Сплави типу нейзильбер, як і латуні, можуть бути однофазними α -сплавами і двофазними зі структурою $\alpha + \beta$. Ці матеріали мають сріблясто-білий колір, добру придатність до карбування, задовільно обробляються тиском у гарячому та холодному стані. Додатки срібла, кадмію, магнію, алюмінію, хрому, цирконію та інші по-різному впливають на електропровідність і механічні властивості таких сплавів [17], що пов'язано з їхньою різною граничною розчинністю [18]. Зазначені властивості нейзильберу зумовили його застосування в монетному виробництві. Банкотно-монетний двір Національного банку України з 1998 року використовує сплав CuNi15Zn20 для виготовлення пам'ятних та ювілейних монет [4].

З економічних міркувань, а також з огляду на менш шкідливий вплив на

людський організм, перспективнішою для розробки монетних сплавів може бути система Cu-Zn (латуні). Подвійні сплави цієї системи групи томпак (3–10% Zn) та напівтомпак (10–20% Zn) мають добрі технологічні властивості, але характеризуються досить низькою корозійною стійкістю та схильні до знецинкування при температурі або взаємодії з корозійними середовищами. Крім того, вони мають електропровідність понад 30% IACS, тоді як для монетної системи України бажано є електропровідність монетного сплаву на рівні 18% IACS [19]. Вказані подвійні сплави можуть бути основою для створення складніших оригінальних сплавів.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

У Фізико-технологічному інституті металів та сплавів Національної академії наук України спільно з Банкотно-монетним двором Національного банку протягом тривалого періоду проводилися систематичні дослідження щодо індивідуального та комплексного впливу легуючих елементів на властивості сплавів системи Cu-Zn, зокрема, на їхню електропровідність.

Дослідні сплави одержували у вакуумній індукційній печі в атмосфері високочистого аргону.

Електропровідність сплавів визначали за допомогою приладу “SMP-1” (“Сигмаскоп” виробництва фірми “X.Fischer”, Німеччина). Точність вимірювання становила $\pm 2\%$, температура під час вимірювань підтримувалася на рівні $+20^\circ\text{C}$.

Одержані результати стали науковою основою для розробки нових перспективних монетних сплавів із заданою електропровідністю.

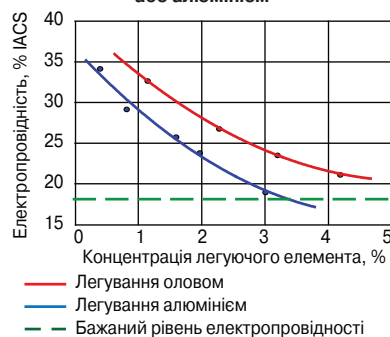
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Проведені дослідження засвідчили, що необхідної електропровідності принципово можна досягати шляхом індивідуального легування сплавів подвійної системи Cu-Zn різними елементами. Але інтенсивність зниження електропровідності при введенні різних легуючих складових суттєво відрізняється. Так, під час легування оловом подвійного сплаву Cu-10Zn його електропровідність знижується досить повільно, і бажаного значення 18% IACS не вдається досягти навіть за концентрації олова у 5% (див. гра-

фік 2). Вміст олова має бути значно більшим, що небажано внаслідок суттєвого здорожчання сплаву в цілому. Алюміній знижує електропровідність подвійного сплаву Cu-10Zn значно ефективніше, і для досягнення 18% IACS достатньо його додати у кількості приблизно 3.5% (див. графік 2). Ще інтенсивніше знижують електропровідність сплаву Cu-10Zn залізо, марганець та кремній [20; 21].

Залізо в концентрації на рівні домішки міститися у переважній більшості сплавів на основі міді та відчутно знижує електропровідність [20; 21]. У латунях залізо практично не розчиняється, при твердненні розплавів латуней воно виділяється з рідкої фази у вигляді дрібних вкраплень, які сприяють утворенню центрів кристалізації. Це призводить до подрібнення зерен α -твердого розчину і, як наслідок, — до поліпшення механічних властивостей, зокрема — відносного подовження [5]. Дослідження низьколегованих потрійних сплавів системи Cu-Zn-Fe [21] не виявили утворення потрійних сполук, які б погіршували їхні властивості. Залізо у невеликій кількості (до 0.4%) можна також рекомендувати в ролі регулятора електропровідності в складніших системах, зокрема у системі Cu-Zn-Sn-Al [21].

Графік 2. Електропровідність подвійної латуні Cu-10Zn, додатково легуваної оловом або алюмінієм



На відміну від заліза, марганець розчиняється в латунях і його вплив на електропровідність у 2.5 рази менший від впливу заліза [20]. У невеликій концентрації марганець також може використовуватися для регулювання електропровідності сплавів на основі системи Cu-Zn.

Кремній у латунях входить до складу α -твердого розчину, а також утворює фазу Cu_3Si . Незважаючи на ефективне зниження електропровідності [21], його використання обмежене внаслідок суттєвого погіршення здатності легуваних кремнієм латуней до пластичної деформації.

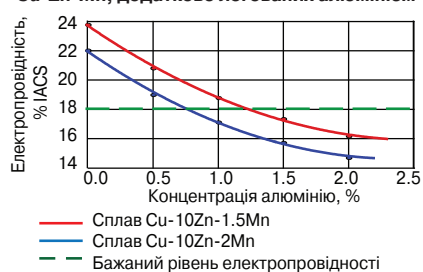
У будь-якому разі індивідуальне легування подвійної системи Cu-Zn залізом, марганцем або кремнієм у кількості, яка б забезпечувала електропровідність на бажаному рівні (18% IACS), неодмінно супроводжується погіршенням інших властивостей сплаву, зокрема технологічних, що робить його непридатним для використання у монетному виробництві. Тільки комплексне легування системи Cu-Zn дає можливість не лише досягнути заданого рівня питомої електропровідності, а й задовольнити інші вимоги (корозійну стійкість, механічні властивості тощо) [22]. Отже, розробка перспективного монетного сплаву потребує дослідження впливу легуючих елементів на властивості не лише подвійної системи сплавів Cu-Zn, а й складніших систем.

Подальші дослідження довели ефективність регулювання електропровідності потрійних сплавів системи Cu-Zn шляхом додаткового легування. Графіки 3–6 відображають характерні залежності електропровідності різноманітних сплавів від концентрації таких легуючих елементів, як алюміній (див. графіки 3–4), нікель (графік 5), кремній (графік 6). Як видно з графіків, за певного вмісту регулюючого елемента електропровідність сплавів сягає бажаного значення 18% IACS.

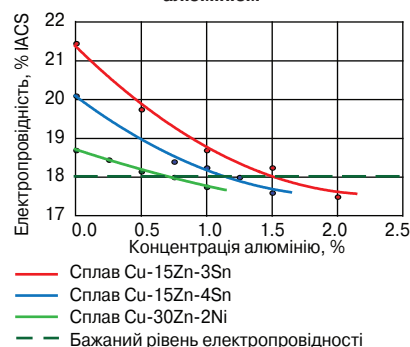
Наведені вище залежності можна використовувати для визначення хімічного складу чотирикомпонентних сплавів із потрібною електропровідністю. Приклад результатів такого дослідження подано на графіку 7. За допомогою марганцю коригується електропровідність сплавів системи Cu-Zn-Al-Sn і досягається її потрібне значення.

На базі одержаних експериментальних даних з урахуванням інших властивостей сплавів було запропоновано кілька перспективних монетних сплавів на основі системи Cu-Zn з електропровідністю 18% IACS для сучасних монет: ЛНА75-2-1, ЛНА67-2-0.75, ЛАО86-2-2.5, ЛАО382-1-1-0.4, ЛАОМц87-1-1-0.5, ЛАОМц82-1-1-0.6, а також сплав з електропровідністю 19% IACS для монет перспективних номіналів: ЛНА75-2-0.5. Комплексні дослідження розроблених сплавів довели, що за умов дотримання рекомендованих технологічних режимів на всіх етапах виготовлення монет запропоновані сплави цілком придатні для застосування в ролі монетних. За своєю корозійною стійкістю сплави не поступаються існуючим

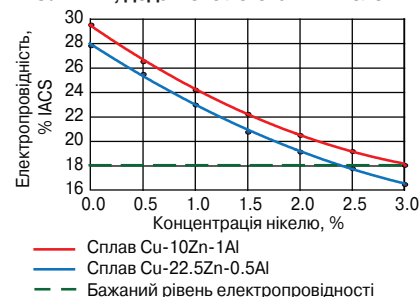
Графік 3. Електропровідність сплавів системи Cu-Zn-Mn, додатково легованих алюмінієм



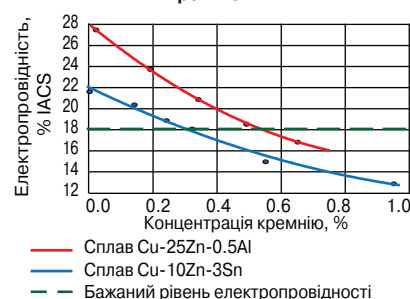
Графік 4. Електропровідність сплавів систем Cu-Zn-Sn та Cu-Zn-Ni, додатково легованих алюмінієм



Графік 5. Електропровідність сплавів системи Cu-Zn-Al, додатково легованих нікелем



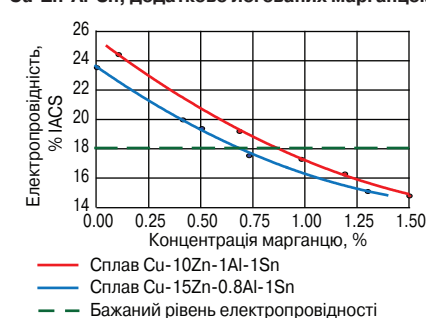
Графік 6. Електропровідність сплавів систем Cu-Zn-Al та Cu-Zn-Sn, додатково легованих кремнієм



аналогам, таким, як відомі монетні сплави БрАН6-2 та "Нордік" [23], а за вартістю значно привабливіші.

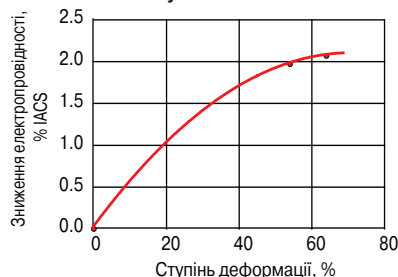
Слід враховувати, що виробництво монет, починаючи від одержання сплаву і закінчуючи безпосередньо карбуванням, – це тривалий технологічний процес, під час якого сплав багатократно піддається пластичній деформації і термічній обробці. Як наслідок електропровідність сплавів, у тому

Графік 7. Електропровідність сплавів систем Cu-Zn-Al-Sn, додатково легованих марганцем



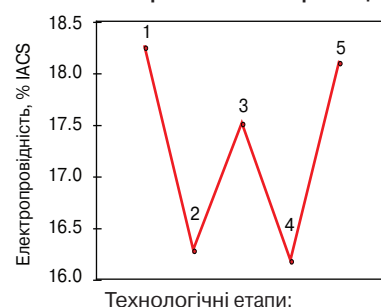
числі і запропонованих, на різних етапах виготовлення монет відрізняється. Кожна операція прокатування зменшує питому електропровідність дослідних сплавів. На графіку 8 наведено експериментальну залежність зниження питомої електропровідності від ступеня

Графік 8. Вплив ступеня деформації на зниження питомої електропровідності сплаву ЛАО86-2-2.5



деформації на прикладі сплаву ЛАО86-2-2.5. Така залежність типова для цієї групи досліджених сплавів та має параболічний характер. Якщо ступінь деформації становить 50%, то зниження питомої електропровідності дорівнює в середньому 2% IACS. Операції відпалювання після пластичної деформації відновлюють зернову структуру сплавів, питома електропровідність при цьому зростає. Характер і динаміка зміни питомої електропровідності внаслідок декількох операцій прокатки та відпалювання подано на

Графік 9. Електропровідність сплаву ЛАО86-2-2.5 на різних етапах виробництва



- Технологічні етапи:
 1 – литий стан;
 2 – прокатування з 7 до 3.2 мм ($\epsilon = 54\%$);
 3 – відпалювання, 730°C;
 4 – прокатування з 3.2 до 1.6 мм ($\epsilon = 50\%$);
 5 – відпалювання, 730°C.



Пробний жетон із перспективного сплаву ЛАОМц81-1-1-0.6.

графіку 9. Як бачимо, рекристалізаційне відпалювання практично відновлює електропровідність сплаву після чергового прокатування, різниця порівняно з вихідним значенням у даному випадку становить 0.15% IACS.

Остаточні свої властивості сплави набувають під час карбування монет. Для випробування запропонованих сплавів було виготовлено дослідну партію жетонів за технологією, яка повністю відповідає технології виготовлення монет. Після карбування було здійснено візуальний контроль пробних жетонів, який засвідчив, що написи та рельєфні частини були повністю відкарбованими і заповнені металом, рант (гурт) жетона – рівномірний, без сколів та розривів (див. фото). Електропровідність відповідала бажаному рівню.

ВИСНОВКИ

Регулювання електропровідності сплавів може здійснюватися шляхом застосування різноманітних технологічних прийомів: легування, модифікування, пластичної деформації, термічної обробки тощо, при цьому найефективнішим методом, що забезпечує стабільні та сталі результати, залишається легування.

Найперспективнішою групою сплавів на основі міді для карбування монет слід вважати латуні, які за порівняно низької вартості дають змогу отримати необхідний комплекс властивостей, включаючи стабільну електропровідність, високу корозійну стійкість і широкий спектр кольорів – від червоного до золотавого.

Відповідне комплексне легування латуней забезпечує не лише задані функціональні та експлуатаційні властивості, а й технологічні, які зумовлюють можливість стабільного виробництва монет.

Можливості поліпшення властивостей латуней за рахунок економного легування не вичерпано, вони можуть стати предметом подальших досліджень і розробки нових монетних сплавів із заданими властивостями. □

Список використаних джерел

1. Плітченко В. В., Шумихін В. С., Петрина Г. В. Удельная электропроводимость как функциональный параметр монетных сплавов // *Металл и литье Украины*. — 2007. — № 8. — С. 30–34. — (Ukrainian source).
2. Gagg C. R., Lewis P. R. Counterfeit coin of the realm — Review and case study analysis // *Engineering Failure Analysis*. — 2007. — V. 14. — № 6. — P. 1144–1152.
3. Song J. Y., Hong S. I. Design and characterization of new Cu alloys to substitute Cu 25%Ni for coinage applications // *Materials and Design*. — 2011. — V. 32. — № 4 — P. 1790–1795.
4. Шумихін В. С., Плітченко В. В. Сплави для монет типу “біколор” // *Металознавство та обробка металів*. — 2004. — № 1. — С. 51–57. — (Ukrainian source).
5. Смирязин А. П., Смирязина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы. — М.: *Металлургия*, 1974. — 488 с. — (Russian source).
6. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. — М.: *Металлургия*, 1972. — 480 с. — (Russian source).
7. Oishi K., Sasaki I., Otani J. Effect of silicon addition on grain refinement of copper alloys // *Mater. Lett.* — 2003. — V. 57. — № 15. — P. 2280–2286.
8. Zhilyaev A. P., Shakhova I., Belyakov A., Kaibyshev R., Langdon T. G. Effect of annealing on wear resistance and electroconductivity of copper processed by high-pressure torsion // *J. Mater. Sci.* — 2014. — V. 49. — № 5. — P. 2270–2278.
9. Wang Y. B., Liao X. Z., Zhao Y. H., Lavernia E. J., Ringer S. P., Horita Z., Langdon T.G., Zhu Y. T. The role of stacking faults and twin boundaries in grain refinement of a Cu-Zn alloy processed by high-pressure torsion // *Mater. Sci. Eng. A* — 2010. — V. 527. — № 18–19. — P. 4959–4966.
10. Peng K., Su L., Shaw L. L., Qian K.-W. Grain refinement and crack prevention in constrained groove pressing of two-phase Cu-Zn alloys // *Scripta Materialia* — 2007. — V. 56. — № 11. — P. 987–990.
11. Kulczyk M., Zysk B., Lewandowska M., Kurzydłowski K. J. Grain refinement in CuCrZr by SPD processing // *J. Phys. Status Solidi A* — 2010. — V. 207. — № 5. — P. 1136–1138.
12. Vinogradov A., Suzuki Y., Ishida T., Kitagawa K., Kopylov V. I. Effect of chemical composition on structure and properties of ultrafine grained Cu-Cr-Zr alloys produced by equal-channel angular pressing // *Materials Transactions* — 2004. — V. 45. — № 7. — P. 2187–2191.
13. Maki K., Ito Y., Matsunaga H., Mori H. Solid-solution copper alloys with high strength and high electrical conductivity // *Scripta Materialia*. — 2013. — V. 68. — №1. — P. 777–780.
14. Lidén C. Nickel allergy and coins // *Mint World Compendium (Coins and Good Health)*. — 2012. — V. 1. — № 1. — P. 12–13.
15. Юм-Розери В. Атомная теория для металлургов. — М.: *Металлургиздат*, 1955. — 332 с. — (Russian source).
16. Шумихін В. С., Плітченко В. В., Лахненко В. Л. Фазовий склад легованих латуней у литому стані та після термообробки // *Металознавство та обробка металів*. — 2007. — № 3. — С. 41–45. — (Ukrainian source).
17. Слиозберг С. К., Чулошников П. Л. *Электроды для контактной сварки*. — Ленинград: *Машиностроение*, 1972. — 96 с. — (Russian source).
18. Лякшиев Н. П. *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник в 3 т.: Том 2*. — М.: *Машиностроение*, 1997. — 1024 с. — (Russian source).
19. Верховлюк А., Лахненко В. Актуальні напрями розвитку монетних систем // *Вісник Національного банку України*. — 2014. — № 8. — С. 61–63. — (Ukrainian source).
20. Шумихін В. С., Плітченко В. В., Апухтін В. В. Влияние примесей железа и марганца на электропроводность литых латунных заготовок // *Процессы литья*. — 2008. — № 2. — С. 62–64. — (Ukrainian source).
21. Верховлюк А. М., Беспалый А. А., Науменко М. И., Апухтін В. В. Влияние кремния и железа на удельную электропроводность латуней в литом состоянии и после термической обработки // *Процессы литья*. — 2012. — № 6. — С. 50–54. — (Ukrainian source).
22. Плітченко В. В. Розробка економного багатоконпонентного сплаву на основі міді для монет середніх номіналів: дис. ...канд. техн. наук: 05.16.01 / Плітченко Валерій Васильович — Київ, 2008. — 160 с. — (Ukrainian source).
23. Верховлюк А., Щерецький О., Науменко М., Лахненко В., Апухтін В. Корозійні властивості монетних матеріалів // *Вісник Національного банку України*. — № 12. — 2014. — С. 30–36.

**Анатолій Верховлюк,
Anatolii Verkhovliuk,**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник; заступник директора з наукової роботи Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України.
Sc.D. (Technics), Senior Staff Scientist; Deputy Director on Research of the Phisico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine.

**Володимир Лахненко,
Volodymyr Lakhnenko,**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник; учений секретар Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України.
Ph.D. (Technics), Senior Staff Scientist; Scientific Secretary of the Phisico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine.

**Олександр Щерецький,
Oleksandr Shcheretskyi,**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник; провідний науковий співробітник Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України.
Sc.D. (Technics), Senior Staff Scientist; Leading Staff Scientist of the Phisico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine.

**Руслан Сергієнко,
Ruslan Sergiienko,**

кандидат технічних наук; старший науковий співробітник Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України.
Ph.D. (Technics); Senior Staff Scientist of the Phisico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine.

**Марія Науменко,
Mariia Naumenko,**

головний технолог Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України.
Chief Process Engineer of the Phisico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine.

**Володимир Апухтін,
Volodymyr Apuhhtin,**

головний технолог Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України.
Chief Process Engineer of the Phisico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Science of Ukraine.

**Олександр Назаренко,
Oleksandr Nazarenko,**

кандидат хімічних наук, молодший науковий співробітник Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України.
Ph.D. (Chemistry), Junior Staff Scientist of the Phisico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine.