

УДК 691.73:005.591.1

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.050722.41.858

ОПТИМІЗАЦІЯ ВМІСТУ ОЛОВА ТА АЛЮМІНІЮ В ОЛОВ'ЯНІЙ БРОНЗИ ЗА ПОКАЗНИКАМИ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

КІМСТАЧ Т. В.^{1*}, *ст. виклад.*,
 УЗЛОВ К. І.², *докт. техн. наук, проф.*,
 РЕП'ЯХ С. І.³, *докт. техн. наук, проф.*,
 СОЛОНЕНКО Л. І.⁴, *канд. техн. наук, доц.*

^{1*} Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Інститут промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 567-85-61, e-mail: 1375tatjana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

² Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Інститут промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. + 38 (067) 950-14-08, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

³ Кафедра ливарного виробництва, Інститут промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 592-70-95, e-mail: 123rs@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-0203-4135

⁴ Кафедра ливарного виробництва, Інститут промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (093) 123-81-40, e-mail: solonenkoli14@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2092-8044

Анотація. Постановка проблеми – розроблення нових складів ливарних бронз, у яких поєднані найкращі рівні властивостей, притаманні як олов'яним, так і алюмінієвим бронзам. **Мета.** Отримання закономірностей між показниками механічних властивостей та вмісту легувальних компонентів у бронзі системи Cu–Sn–Al за вмістом олова та алюмінію до 6 % кожного. **Методика.** Сплави для досліджень готували шляхом сплавлення первинних шихтових матеріалів технічної чистоти в індукційній печі тигельної з використанням графітового тигля і деревного вугілля як покривного матеріалу. Механічні властивості досліджуваних сплавів розраховували за результатами випробувань відповідних зразків із їх статичним розтягом й ударним вигином за кімнатної температури згідно з діючими стандартами. Контроль хімічного складу сплавів здійснювали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L на зразках, вирізаних із тріфоподібних проб. Побудову поверхонь відгуку досліджуваної багатокомпонентної системи проводили методом симплекс-планування Г. Шеффе з моделями четвертого та третього ступеня. **Результати та їх обговорення.** За результатами досліджень сплавів системи Cu–Sn–Al у роботі встановлено функціональні залежності між показниками механічних властивостей та вмістом Sn та Al з масовою часткою від 1 до 6 % кожного, що дає можливість прогнозувати рівень механічних властивостей за хімічним складом такої бронзи при литті. **Висновки.** Встановлено, що у досліджених межах вмісту олова та алюмінію найкраще поєднання механічних властивостей має бронза БрОЗА3 з умістом Sn = (3...4) % та Al = (3...4) %. Бронза БрОЗА3 має більш високі (зокрема пластичні) значення механічних властивостей порівняно із властивостями олов'яних бронз, які найчастіше використовують в промисловості. Це дає підставу рекомендувати дану бронзу для виготовлення фасонних виливків та підшипників тертя.

Ключові слова: олов'яні бронзи; алюмінієві бронзи; механічні та технологічні властивості; легувальні елементи; оптимізація; метод симплекс-планування

OPTIMIZATION OF TIN AND ALUMINUM CONTENT IN TIN BRONZE ACCORDING TO MECHANICAL PROPERTIES INDICATORS

KIMSTACH T.V.^{1*}, *Senior Lecturer*,
 UZLOV K.I.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
 REPYAKH S.I.³, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
 SOLODENKO L.I.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Ukrainian State University of Science and Technology, Institute of Industrial and Business Technologies, Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, 4, Naharina Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (097) 567-85-61, e-mail: 1375tatjana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

² Ukrainian State University of Science and Technology, Institute of Industrial and Business Technologies, Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, 4, Haharina Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (067) 950-14-08, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

³ Ukrainian State University of Science and Technology, Institute of Industrial and Business Technologies, Foundry Department, 4, Haharina Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 592-70-95, e-mail: 123rs@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-0203-4135

⁴ Ukrainian State University of Science and Technology, Institute of Industrial and Business Technologies, Foundry Department, 4, Haharina Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (093) 123-81-40, e-mail: solonenkoli14@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2092-8044

Abstract. Problem statement. New compositions of foundry bronzes in which the best levels of properties inherent in both tin and aluminum bronzes are combined need to be developed. **Purpose of research.** Regularities between mechanical properties indicators and alloying components content in bronze of Cu–Sn–Al system with tin and aluminum content up to 6 % each are obtained. **Methodology.** Alloys for investigation was prepared by technical purity primary charge materials melting in induction crucible furnace using graphite crucible and charcoal as a coating material. Investigated alloys mechanical properties was calculated based on tests results of corresponding samples during their static elongation and impact bending at room temperature according to actual standards. Alloys chemical composition control was carried out on precision analyzer EXPERT 4L on samples cut from cross-shaped samples. Investigated multicomponent system response surfaces plotting was performed by H. Scheffe simplex-planning method with models of fourth and third degree. **Results and discussion.** According to Cu–Sn–Al alloys research results, functional dependences between mechanical properties vs. Sn and Al content from 1 to 6 % by weight of each are determined. This makes it possible to predict the level of mechanical properties according to chemical composition of such bronze during casting. **Conclusions.** It was found that within tin and aluminum content in investigated limits the best combination of mechanical properties has bronze BrO3A3 with content of Sn = (3...4) % and Al (3...4) %. Bronze BrO3A3 has higher (including plastic) mechanical properties values compared to the properties of tin bronzes, which are most often used in industry. This gives the reason to recommend such bronze for shaped castings and friction bearings manufacturing.

Keywords: tin bronzes; aluminum bronzes; mechanical and technological properties; alloying elements; optimization; simplex-planning method

Вступ

Бронзи належать до індустріальних сплавів, які найбільш широко використовують в техніці. Це зумовлено тим, що бронзи являють собою раціональний ливарний матеріал із задовільною корозійною стійкістю виробів, які легко піддаються механічній обробці різальним інструментом, здатні до пластичної деформації та мають підвищені триботехнічні властивості тощо.

Подальший розвиток сучасної техніки і підвищення вимог до надійності будь-якої бронзової деталі потребують від бронз більш високого рівня експлуатаційних властивостей і довговічності, підвищеної пластичності та можливості зберігання своїх механічних та експлуатаційних властивостей після короткочасної роботи за високих температур завдяки сталості структурного стану і т. ін.

На сьогодні такі можливості відомих марок бронз практично вичерпані. Про це свідчать дані аналізів як відповідного стандарту щодо ливарних бронз, так і

науково-технічних джерел [1–8]. При цьому серед численних марок бронз найбільшого поширення набули олов'яні та алюмінієві бронзи, які значно різняться між собою за рівнем як механічних, так і експлуатаційних властивостей. Тому безперечний інтерес становить дослідження властивостей бронзи, у складі якої присутні як алюміній, так і олово, для її подальшого застосування у виготовленні як фасонних виливків (зокрема, заірної арматури), так і триботехнічних деталей. Проте наразі такі дані для алюмінієво-олов'яних бронз майже відсутні.

Тому дослідження, присвячені розробленню нових складів ливарних бронз, у яких поєднані найкращі рівні властивостей, притаманних водночас олов'яним і алюмінієвим бронзам, бачиться актуальними.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Серед відомих марок бронз нині в промисловості та в побуті найширше

застосування знайшли олов'яні бронзи, з яких виготовляють арматуру загального призначення, в тому числі елементи тертя арматури, високонавантажені деталі шнекових приводів, натискні та шпindelні гайки, вінці черв'ячних шестерень, антифрикційні деталі, вкладиші підшипників, облицювання гребних валів, деталі, що працюють у мастил тощо [9].

Олов'яні бронзи як ливарний матеріал (масовий вміст олова 2...11 %) мають малу чутливість до перегрівання, не схильні до високої насиченості газами, добре обробляються лезовим інструментом, мають широкий інтервал кристалізації, завдяки чому не схильні до появи усадкових раковин у виливках. У морській воді олов'яні бронзи демонструють преференційну корозійну стійкість порівняно з міддю та латунями [10]. Включення евтектоїдної структурної складової з δ -фазою ($\text{Cu}_41\text{Sn}_{11}$ – просторова група $F\bar{4}3m$ [11; 12]) забезпечують таким бронзам ефективні антифрикційні властивості, низький коефіцієнт тертя, високий опір зносу.

Автори праці [13] високі триботехнічні характеристики олов'яних бронз пояснюють із точки зору теорії самоорганізації. Згідно з цією теорією під час тертя в поверхневих шарах олов'яних бронз відбувається нерівноважний процес виділення олова з твердого розчину. Це зумовлює зниження коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування. Але, водночас, присутність у структурі литих олов'яних бронз твердої δ -фази зумовлює їх невисоку пластичність, про що свідчать наявні показники відносного видовження – 4...12 % [14; 15].

Ця обставина особливо небезпечна під час використання великогабаритних деталей за від'ємних температур. Також суттєвим недоліком олов'яних бронз стала відносно невисока стійкість до руйнування та відносно невисокі показники втомної міцності.

Олово, що є основним легувальним елементом таких бронз, належить до дефіцитних і коштовних речовин [16]. З метою зниження собівартості олов'яних бронз у них зменшують вміст коштовного і

дефіцитного олова за рахунок додаткового легування іншими елементами (це фосфор, свинець, цинк та нікель) [14; 17–19].

Додавання фосфору до олов'яних бронз підвищує їх механічні, антифрикційні та ливарні характеристики [20; 21]. Фосфор у бронзах із невеликою кількістю олова підвищує опір зносу за рахунок появи у структурі частинок фосфіду міді Cu_3P з підвищеною мікротвердістю. За вмісту понад 0,5 % (мас.), фосфор погіршує технологічну пластичність бронз. Тому в ливарних антифрикційних бронзах вміст P обмежено 1,2 % (мас.).

Свинець практично нерозчинний в олов'яних бронзах у твердому стані. Тому під час затвердіння бронзи він виділяється як самостійна дрібна міждендритна фаза. Це викликає збільшення щільності бронзи, її антифрикційних властивостей та обробки різанням [22; 23], але погіршує її механічні властивості [17; 24]. І все ж, для виготовлення підшипників ковзання використовують бронзи, в яких свинець – основний та неодмінний легувальний елемент (BrO5C25, BrO10C10).

Один з основних легувальних елементів в олов'яних бронзах – цинк у кількості від 2 до 12 % (мас.), який сприятливо впливає на їх механічні і ливарні властивості, зменшує схильність до зворотної ліквідації під час кристалізації. В цьому випадку підвищення механічних властивостей олов'яних бронз зумовлене тим, що у твердому стані цинк є розчиненим у α -Cu-фазі бронзи [25]. Вважається, що додавання цинку у бронзу рівнозначне введенню олова, але в удвічі меншій кількості [21]. Суттєвий недолік цинку, з точки зору санітарно-гігієнічних та екологічних умов виробництва, його випаровування під час плавки та заливання ливарних форм.

Нікель уже за вмісту 0,5...1 % (мас.) позитивно впливає на структуру та властивості виливків [26], підвищуючи міцність бронзи та її пластичність, корозійну стійкість, щільність та зменшуючи при цьому ліквідацію [19; 27].

Залізо поліпшує механічні властивості та температуру рекристалізації бронзи.

Проте зі збільшенням його вмісту погіршуються технологічні та особливо корозійні властивості бронз [28].

Ливарні сплави системи мідь–алюміній (тобто алюмінієві бронзи з масовим вмістом алюмінію 7...11 %), порівняно зі сплавами мідь–олово, характеризуються більш високим рівнем міцності та пластичності (до 20 %) [29]. З алюмінієвих бронз виготовляють литі деталі, які характеризуються високим рівнем корозійної стійкості, що дозволяє виготовляти з них не тільки антифрикційні деталі, а і деталі арматури, які працюють в агресивних середовищах і за підвищених температур. Причина цього – присутність алюмінію, який формує на поверхні деталей непроникну захисну плівку Al_2O_3 . Також переваги алюмінієвих бронз, порівняно з олов'яними, це більш високі жароміцність та протикавітаційна стійкість, менша схильність до холодноламкості [17].

До недоліків алюмінієвих бронз, порівняно з олов'яними, слід віднести більш низькі ливарні властивості, зокрема, схильність до появи у виливках гарячих тріщин та рихлот, усадкових раковин, високу лінійну усадку, невисоку корозійну стійкість у перегрітій водяній парі, воді, складність паяння [17].

Алюмінієві бронзи, для усунення притаманних їм недоліків і підвищення механічних та службових властивостей, додатково легують залізом, марганцем, нікелем та свинцем.

У сплавах $Cu-Al-Fe$ з боку міді розчиняється до 4 % Fe . У разі одночасного легування алюмінієвих бронз нікелем і марганцем розчинність заліза в α -фазі знижується і за меншого його вмісту з'являється залізовмісна складова. Залізо підвищує міцнісні властивості алюмінієвих бронз із деяким зниженням їх пластичності, значно подрібнює зерно припад час кристалізації та рекристалізації.

Марганець розчиняється в алюмінієвих бронзах у великій кількості (до 10 %), підвищує міцність бронз, їх пластичність, корозійну стійкість, антифрикційні властивості [15].

Нікель значно зменшує розчинність алюмінію у міді за зниження температури, поліпшує механічні властивості та корозійну стійкість алюмінієвих бронз, підвищує температуру їх рекристалізації та жароміцні властивості [17].

Свинець підвищує гарячеламкість (особливо за вмісту $Pb < 2\%$), практично не впливає на технологічні властивості під час виготовлення виливків, у той же час підвищує оброблюваність різанням (карбування та гравіювання).

Уведення в мідь-алюмінієві сплави олова як легувального елемента дозволяє підвищити корозійну стійкість і опір абразивному зносу [30]. Однак при цьому знижуються показники міцності і підвищується твердість сплаву [31].

Такі домішки як цинк (за малого його вмісту в сплаві – до 0,5 %) та фосфор поліпшують рідкоплинність, знижують міцність і пластичність, підвищують твердість, знижують корозійну стійкість. Цинк також зменшує газонасиченість розплаву. Кремній як домішка, поліпшує рідкоплинність, викликає пористість виливків, знижує механічні властивості, підвищує твердість. Магній, сірка, миш'як, сурма погіршують механічні властивості сплавів, зменшують щільність та герметичність виливків [31].

Невеликий вміст титану збільшує щільність виливків та їх міцність. Сприятливий вплив титану на властивості бронз зумовлений його дією як дегазатора, що зменшує газонасиченість розплаву, та модифікатора, який подрібнює зерно в литій бронзі (детальніше про закономірності впливу легувальних елементів на структуроутворення сплавів системи $Cu-Al$ див., наприклад, [32]).

Мета і завдання досліджень

Мета роботи – визначити оптимальний склад сплаву системи $Cu-Sn-Al$ за вмісту олова та алюмінію до 6 % кожного. Нова оптимізована сукупність основних хімічних елементів бронзи має забезпечити отримання значень механічних властивостей на рівні:

$\sigma_v \geq 200$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 110$ МПа, $\delta \geq 15$ %, $KCU \geq 50$ Дж/см² за рахунок позитивної синергії адитивних впливів кожного з компонентів.

Завдання дослідження – отримання методом симплекс-планування закономірностей між експериментально визначеними показниками механічних властивостей та вмістом легувальних компонентів у бронзі системи Cu–Sn–Al за концентрацій олова та алюмінію в сплавах до 6 % кожного.

Методика досліджень

Для досліджень сплави готували шляхом сплавлення первинних шихтових матеріалів технічної чистоти в індукційній печі тигельної з використанням графітового тигля і деревного вугілля як покривного матеріалу. Температуру вимірювали хромель-алюмелевою термопарою у комплекті з потенціометром АТ4208.

Механічні властивості досліджуваних сплавів розраховували за результатами випробувань відповідних зразків за їх статичного розтягу й ударного вигину за кімнатної температури. Зразки для випробувань виготовляли механічною обробкою брусків із тріфоподібної проби, яку одержували шляхом заливання розплаву в піщано-рідкоскляні форми (ПРФ), що мали вміст РС 5 % за масою. Виготовляли

ПРФ набиванням піщано-рідкоскляної суміші з подальшим вилученням зі стрижневого ящика та сушінням у мікрохвильовому середовищі протягом 7 хвилин. Після механічної обробки брусків зразки на статичний розтяг із розмірами робочої частини $\varnothing 6 \times 30$ мм відповідали ДСТУ ISO 6892-1:2019 [33], зразки для випробувань на ударний вигин з U-подібним концентратором розмірами $10 \times 10 \times 55$ мм відповідали ISO 148-1:2016 [34].

Випробування зразків на статичний розтяг проводили на універсальній випробувальній машині FP100/1, оснащених системою автоматичного запису діаграми розтягу з визначенням параметрів тимчасового опору під час розтягуванні (σ_v) й умовної межі плинності ($\sigma_{0,2}$) при зусиллі 40 кН та швидкості переміщення траверси 1 мм/хв за температури 20 °С.

Відносне подовження (δ_5) та звуження (ψ) розраховували за результатами вимірювання довжин та діаметрів робочої частини зразків до та після їх випробувань штангенциркулем з точністю 0,02 мм. Випробування на ударний вигин виконували за температури 20 °С відповідно до вимог ISO 148-1:2016 [34], на маятниковому копрі марки PSW 30 з максимальною енергією удару 300 Дж.

Твердість визначали відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 [35].

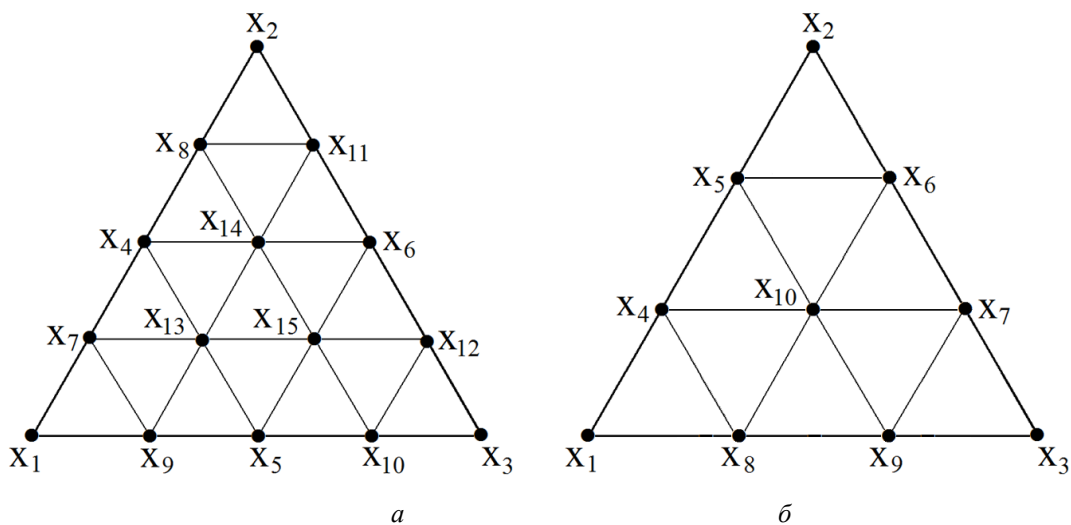


Рис. 1. Симплексні решітки для трикомпонентної системи у вигляді моделі четвертого (а) та третього (б) ступеня

Контроль хімічного складу сплавів здійснювали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L на зразках, вирізаних із тріфазних проб. Для визначення оптимальної області в системі склад-властивість як три вихідні компоненти прийняли сплави міді з 6 % (мас.) Al і 1 % (мас.) Sn (x_1), 6 % (мас.) Al і 4 % Sn (x_2), 1 % Al і 6 % (мас.) Sn (x_3). При цьому за результатами попередніх експериментів із бронзами, що мають різний вміст алюмінію та олова, у зазначених вище межах, для побудови поверхонь відгуку досліджуваної багатокомпонентної системи використовували метод симплекс-планування Г. Шеффе [36] з моделями четвертого та третього ступеня.

Симплексні решітки для побудови моделі четвертого та третього ступеня за методом Г. Шеффе показані на рисунку 1.

Мікроструктурні дослідження проводили на металографічних мікрошліфах, виготовлених за стандартними методиками [37; 38] на оптичному мікроскопі Neophot-21.

Результати досліджень

До параметрів, які оптимізували в наявній роботі, входили: тимчасовий опір за статичного розтягу (σ_b), межа плинності ($\sigma_{0,2}$), відносне видовження (δ_5) та ударна в'язкість (КСУ). Для оптимізації хімічного складу бронзи по σ_b і $\sigma_{0,2}$ використовували симплекс-решітчастий план Г. Шеффе з моделлю четвертого ступеня (рис. 1, а):

$$Y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \gamma_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \gamma_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \gamma_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3) + \delta_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2)^2 + \delta_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3)^2 + \delta_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3)^2 + \beta_{1123} (x_1)^2 x_2 x_3 + \beta_{1223} x_1 (x_2)^2 x_3 + \beta_{1233} x_1 x_2 (x_3)^2 \tag{1}$$

і по δ_5 , КСУ – з моделлю третього ступеня (рис. 1, б):

$$Y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \gamma_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \gamma_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \gamma_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3) + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 \tag{2}$$

Таблиця 1

План-матриця активних експериментів для σ_b і $\sigma_{0,2}$ (рис. 1, а)

Параметр	Масовий вміст Al і Sn у точках на симплексній решітці														
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}
Al, %	6	6	1	6	3,5	3,5	6	6	4,75	2,25	4,75	2,25	4,75	4,75	3,5
Sn, %	1	4	6	2,5	3,5	5	1,75	3,25	3	5,5	3,75	4,75	3,75	3	4,25

Таблиця 2

План-матриця активних експериментів для δ_5 , КСУ (рис. 1, б)

Параметр	Масовий вміст Al і Sn у точках на симплексній решітці									
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
Al, %	6	6	1	6	6	4,33	2,67	4,33	2,67	4,33
Sn, %	1	4	6	2	3	4,67	5,33	4,33	4,33	3,67

План-матриця активних експериментів представлена як таблиці 1 та 2.

Процес оптимізації полягав у визначенні поверхні концентрацій алюмінію і олова, за яких бронза, що розробляється, відповідає всім заданим рівням властивостей. Шукану поверхню

концентрацій визначали за результатом затемнення поверхонь симплексних решіток, які не відповідають заданим вимогам, з їх подальшим масштабуванням та послідовним накладенням отриманих зображень одне на одне.

Для визначення оптимальної області в системі склад-властивість бронзи системи Cu-Sn-Al реалізували активний експеримент. При цьому оптимальною

вважали сукупність вмістів олова та алюмінію в сплаві, за яких механічні властивості бронзи відповідали б значенням, наведеним у таблиці 3.

Таблиця 3

Механічні властивості у литому стані

σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	КСУ, Дж/см ²	НВ, МПа
≥ 220	≤ 130	20...30	≥ 50	≥ 750

Результати реалізації активного експерименту за план-матрицею планування та коефіцієнти регресії для σ_B і $\sigma_{0,2}$, що були

розраховані відповідно до схеми на рисунку 1, а, наведені в таблицях 4–6, відповідно.

Таблиця 4

Реалізована план-матриця активного експерименту для σ_B та $\sigma_{0,2}$

Параметр	Точки на симплексній решітці (рис. 2, а, б)														
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅
σ_B , МПа	315	217	222	247	226	257	271	228	275	239	227	225	252	230	233
$\sigma_{0,2}$, МПа	114	106	131	141	115	148	134	128	129	141	109	122	141	133	138

Таблиця 5

Коефіцієнти регресії для σ_B

Коефіцієнти регресії	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}	γ_{23}	δ_{12}	δ_{13}	δ_{23}	β_{1123}	β_{1223}	β_{1233}
Значення для σ_B	315	217	222	-76	-170	150	-32	-56	24	-48	434,7	-461,3	1000	-424	-330,7

Таблиця 6

Коефіцієнти регресії для $\sigma_{0,2}$

Коефіцієнти регресії	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}	γ_{23}	δ_{12}	δ_{13}	δ_{23}	β_{1123}	β_{1223}	β_{1233}
Значення для $\sigma_{0,2}$	114	106	131	124	-30	118	10,67	-18,7	-2,67	-48	386,7	-536	482,7	2,67	-26,67

Результати реалізації активного експерименту за план-матрицею планування та розрахункові значення коефіцієнтів регресії для δ_5 і КСУ, відповідно до схеми

на рисунку 1, б, наведені у таблицях 7 та 8, відповідно.

Симплексні трикутники, побудовані з використанням даних таблиць 6 та 8, показані на рисунку 2.

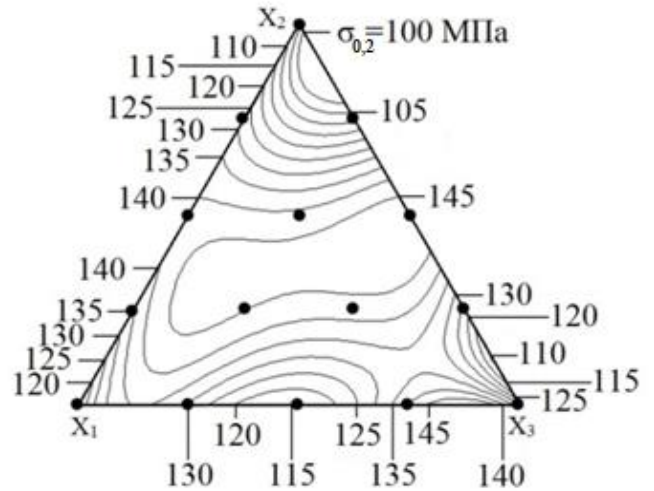
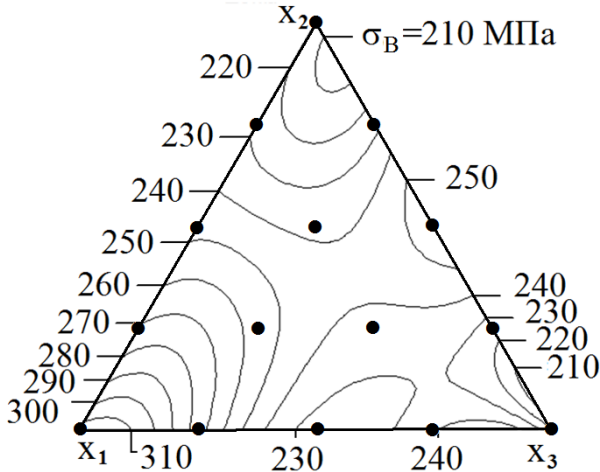
Таблиця 7

Реалізована план-матриця активного експерименту для δ_5 та КСУ

Параметр	Точки на симплексній решітці (рис. 2, в, г)									
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
δ_5 , %	33	15	20	26	21	16	18	19	25	22
КСУ, Дж/см ²	127	35	57	94	62	40	47	49	79	69

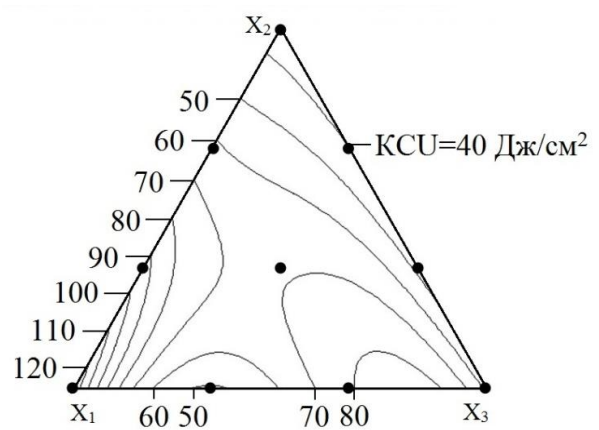
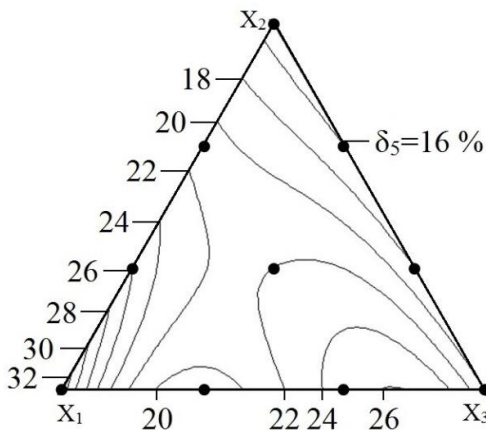
Коефіцієнти регресії для δ_5 и КСУ

Коефіцієнти регресії	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}	γ_{23}	β_{123}
Значення для δ_5	33	15	20	-2,25	-20,25	-2,25	-6,75	-69,75	-2,25	56,25
Значення для КСУ	127	35	57	-13,5	-126	-11,25	9	-360	2,25	344,2



a

б



в

г

Рис. 2. Поверхня відгуку в симплексній решітці для σ_B (а), $\sigma_{0,2}$ (б), δ_5 (в) і КСУ (г)

Використовуючи дані таблиці 3, на симплексних трикутниках затемнили ділянки, що не відповідають вимогам до рівня бажаних механічних властивостей у бронзі, яка розробляється.

Результати затемнення ділянок наведені на рисунку 3.

Для визначення оптимальної області вмісту в бронзі олова та алюмінію зображення симплексних трикутників,

наведених на рисунку 3, наклали одне на одного. Результати накладання зображень симплексних трикутників (результуючий симплексний трикутник) та їх ключ показані на рисунку 4.

Обговорення результатів

Аналіз отриманих даних показує, що рівень механічних властивостей досліджуваних сплавів залежно від вмісту в

них Sn та Al має складний і переважно суперечливий характер. Проте з результату накладання зображень симплексних трикутників, наведеного на рисунку 4, а (оптимальна область виділена жовтим кольором), виходить, що у досліджених межах вмісту олова та алюмінію найкраще поєднання механічних властивостей має бронза із вмістом Sn = (3...4) % (мас.) та

Al = (3...4) % (мас.). Очевидно, що одержане в роботі оптимальне співвідношення основних компонентів сплаву не відповідає жодній стандартній за ГОСТ 613 [8] бронзі. Тому в нашому дослідженні ця оптимальна композиція була умовно позначена як БрОЗА3 – за образом та подібністю нормативних марок бронз.

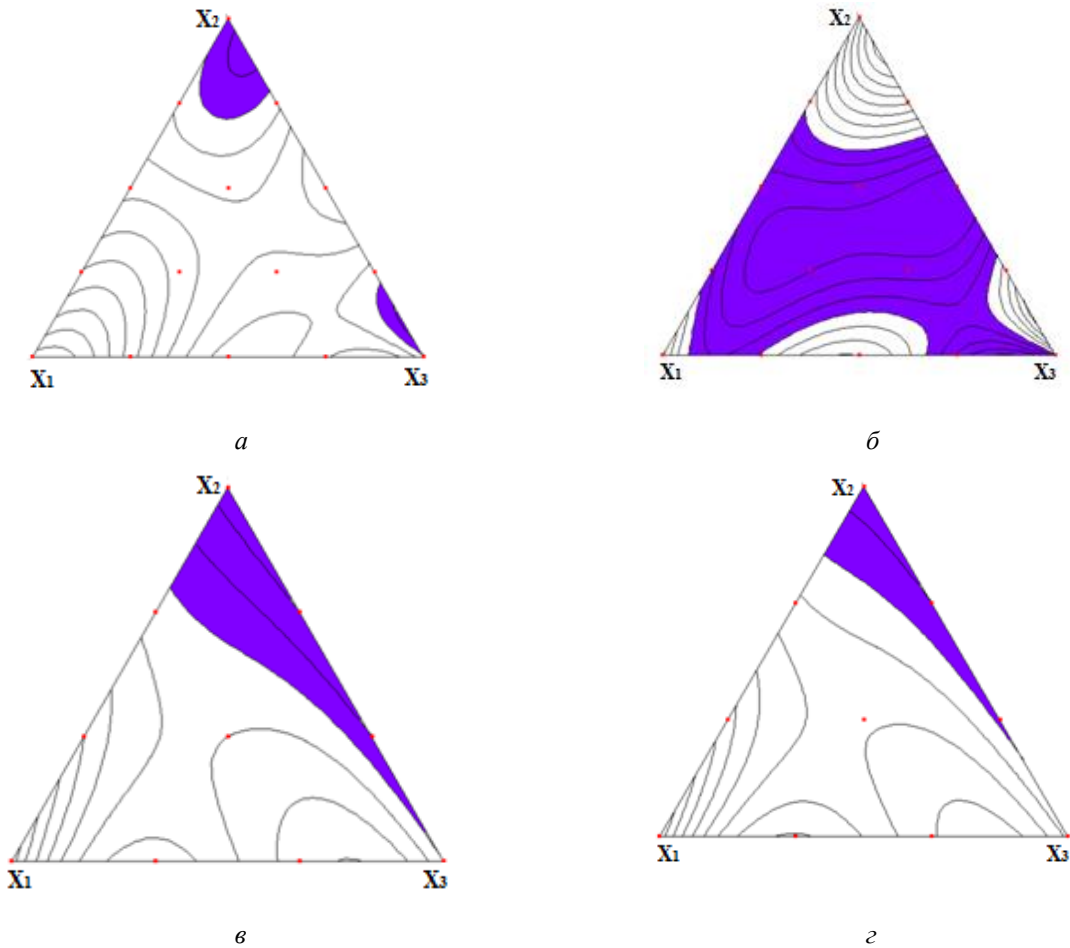


Рис. 3. Результати затемнення ділянок на симплексних трикутниках для σ_B (а), $\sigma_{0,2}$ (б), δ_5 (в) і KCU (г)

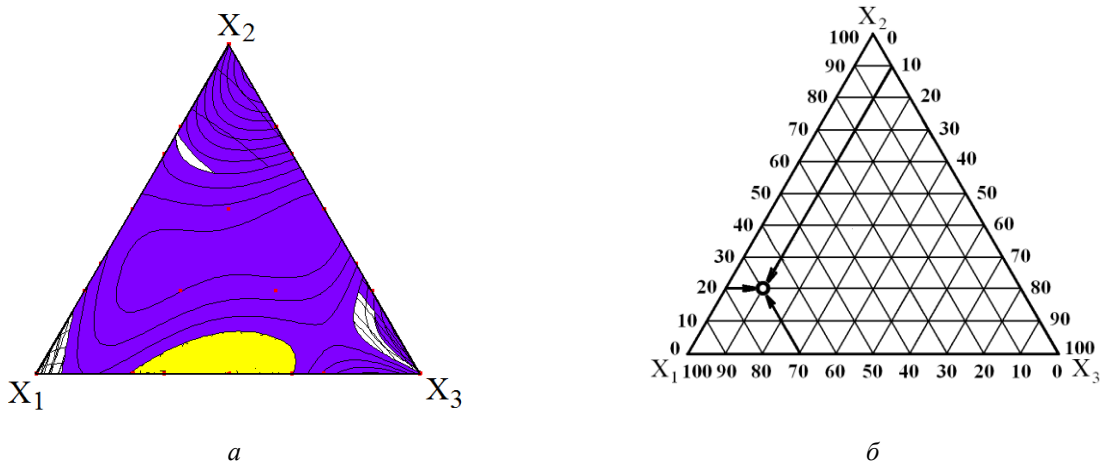


Рис. 4. Результати накладання зображень симплексних трикутників (а) та їх ключ (б)

Хімічний склад та властивості досліджуваної бронзи БрО3А3 наведено у таблиці 9.

На рисунку 5 показано результати порівняльного мікроструктурного аналізу зразків ливарної бронзи БрО5Ц5С5 за ГОСТ 613 [8] та дослідного сплаву БрО3А3.

Результати мікроструктурного аналізу (рис. 5) демонструють принципово подібний структурний стан зразків ливарної бронзи БрО5Ц5С5 за ГОСТ 613 [8] та дослідного сплаву БрО3А3. При цьому для бронзи БрО5Ц5С5 за ГОСТ 613 передумовлений такий рівень механічних характеристик: $\sigma_B \geq 147 \dots 176$ МПа, $\delta_5 \geq 4 \dots 6$ %, $HB \geq 588$ МПа.

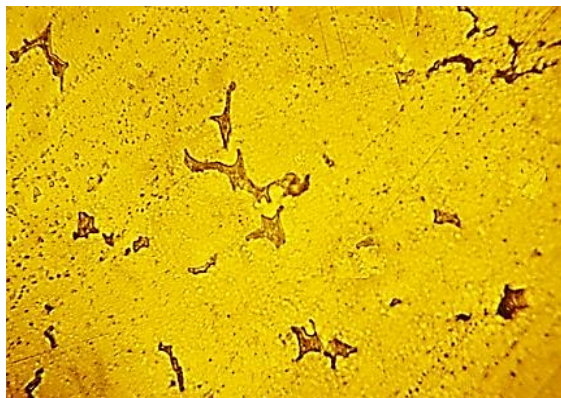
Встановлення природи такої невідповідності, а саме, преференційних показників механічних властивостей дослідної бронзи БрО3А3 (табл. 9), за однакового структуроутворення сплавів, належить подальшим дослідженням.

Тобто порівняльний аналіз механічних властивостей бронзи БрО3А3 із властивостями олов'яних бронз, які найчастіше використовують в промисловості (наприклад – БрО5Ц5С5 за ГОСТ 613 [8]), показує, що БрО3А3 має більш високі (зокрема пластичні) показники механічних властивостей. При цьому одержаний рівень твердості запропонованого сплаву впевнено задовольняє нормативно встановлені вимоги до цієї характеристики (табл. 9). Це дає підстави рекомендувати дану бронзу для виготовлення фасонних виливків та підшипників тертя. Так, наприклад, матеріал порівняння БрО5Ц5С5 нормативно рекомендований ГОСТ 613 [8] для промислового виготовлення антифрикційних деталей та елементів підшипників.

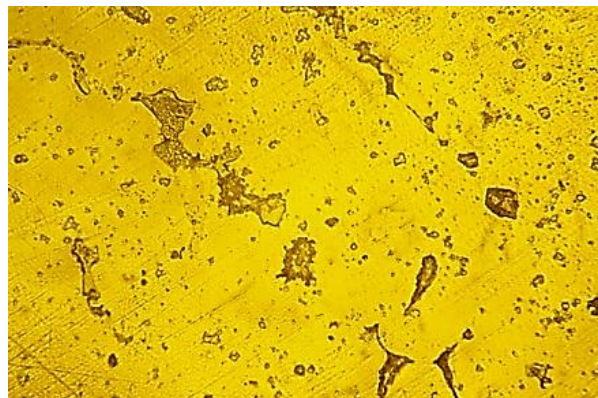
Таблиця 9

Хімічний склад та властивості бронзи БрО3А3

Вміст елементів, масова частка %			Механічні властивості				
Sn	Al	Cu	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²	HB, МПа
3...4	3...4	Решта	220...300	115...130	20...30	57...62	680...750



а



б

Рис. 5. Мікроструктури дослідної БрО3А3 (а) та стандартної за ГОСТ 613 БрО5Ц5С5 (б) бронз, відлитих у піщано-рідкоскляні форми, $\times 500$

Висновки

За результатами досліджень впливу Sn та Al (від 1 до 6 % за масою, кожного) на механічні властивостей сплавів системи Cu–Sn–Al встановлено, що:

– найкраще поєднання механічних властивостей ($\sigma_B = 220 \dots 300$ МПа,

$\sigma_{0,2} = 115 \dots 130$ МПа, $\delta = 20 \dots 30$ %, $KCU = 57 \dots 62$ Дж/см², $HB = 680 \dots 750$ МПа) має бронза з вмістом Sn = (3...4) % (мас.) та Al = (3...4) % (мас.);

– бронза БрО3А3, оптимізованого в роботі складу, порівняно з олов'яними бронзами, які найчастіше використовують у

промисловості, зокрема, з бронзою БрО5Ц5С5, має більш високий рівень механічних властивостей;

– одержані в роботі результати є підставою для рекомендування нового сплаву як альтернативного матеріалу для

виготовлення промислових деталей антифрикційного призначення після додаткового вивчення закономірностей його структуроутворення, експлуатаційних властивостей тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пономаренко О. И., Шинский И. О., Моргун Н. Н. Литье по газифицируемым моделям бронзовых сплавов. *Литейное производство*. 2004. № 11. С. 30.
2. Макаревич О. П., Федоров Г. Е., Платонов С. О. Виробництво виливків із спеціальних сталей. Київ : Вид-во Київ. політехн. ін-ту, 2005. 712 с.
3. Пономаренко О. И., Лысенко Т. В., Становский А. Л., Шинский. О. И. Управление литейными системами и процессами : монография. Харьков : Изд-во Харьк. политехн. ин-та, 2012. 368 с.
4. Миронов А. Е., Гершман И. С., Гершман Е. И. Новые алюминиевые антифрикционные сплавы взамен бронз для монометаллических подшипников, работающих в условиях граничного трения. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2016. № 4 (52). С. 22–31.
5. Миронов А. Е., Котова Е. Г. (Карачарова). Разработка новых марок литейных алюминиевых антифрикционных сплавов для замены бронз в узлах трения. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13, № 4 (3). С. 1136–1140.
6. Tada H., Paris P. C., Irwin G. R. *The Stress Analysis of Cracks Handbook*. Paris Productions, St. Louis. 1985.
7. О необходимости повышения качества бронзового литья. URL : <http://stroykomtech.ru/o-neobxodimosti-povysheniya-kachestva-bronзового-litya> (дата звернення : 22.04.2022).
8. ГОСТ 613-79. Бронзы оловянные литейные. [Дата введения : 1980-01-01]. Москва : ИПК Издательство стандартов; Межгосударственный стандарт, 1980. 5 с.
9. Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы. Москва : Металлургия, 1974. 488 с.
10. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Реп'ях С. І., Солоненко Л. І. Аналіз впливу різних середовищ на корозійну стійкість мідних сплавів. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2021. № 3 (94). С. 36–45.
11. ASM Metals Handbook. Volume 03: Alloy Phase Diagrams. ASM International. URL : http://www.asminternational.org/search/-/journal_content/56/10192/25871543/PUBLICATION (дата звернення: 22.04.2022).
12. Диаграммы состояния двойных металлических систем : справоч. в 3 т. Под. общей редакцией Н. П. Лякишева. Москва : Машиностроение, 1997. Т 2. 1024 с.
13. Гершман И. С., Буше Н. А. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибо системах. *Трение и износ*. 1995. Т. 16, № 1. С. 61–70.
14. Арзамасов Б. Н., Брострем В. А., Буше Н. А. и др. Конструкционные материалы : справоч. Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. Москва : Машиностроение, 1990. 688 с.
15. Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов : учебник для вузов. Москва : МИСИС, 2005. 432 с.
16. Макаревич О. П., Федоров Г. Е., Платонов С. О. Виробництво виливків із спеціальних сталей. Київ : Вид-во Київ. політехн. і-ту, 2005. 712 с.
17. Меркулова Г. А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов : учеб. пособ. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2008. 312 с.
18. Осинцев О. Е., Федоров В. Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки : справоч. Москва : Машиностроение, 2004. 336 с.
19. Лебедев К. П., Райнес Л. С., Шемтов Г. С. и др. Литейные бронзы. Ленинград : Машиностроение, 1973. 312 с.
20. Aksoya M., Kuzucub V., Turhanc H. A note on the effect of phosphorus on the microstructure and mechanical properties of leaded-tin bronze. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 124, iss. 1–2. Pp. 113–119.
21. Червякова В. В., Пресняков А. А. Сложные латуни и бронзы. Алма-Ата : Наука, 1974. 262 с.
22. Lunn B. The wear resistance of tin bronzes and related alloys. *Wear*. 1965. № 8. Pp. 401–406.
23. Oda Y., Rimura M., Nakajima K. Changes in the structure and composition of automobile big-end bearing materials and their relation to bearing failure. *Wear*. 1972. Vol. 20, № 2. Pp. 159–164.
24. Pathak J. P., Tiwari S. N. On the mechanical and wear properties of copperlead bearing alloys. *Wear*. 1992. № 155 (1). Pp. 37–47.
25. Мысик Р. К., Сулицин А. В., Брусницын С. В. Литейные сплавы на основе тяжелых цветных металлов : учеб. пособ. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. 140 с.
26. ASM Metals Handbook, desk edition, ASM International. 1998. 2571 p.
27. Захаров А. М. Промышленные сплавы цветных металлов. Москва : Металлургия, 1980. 256 с.

28. Ильин А. И. Антифрикционные оловянно-свинцовистые бронзы для паровозов ФД и ИС. Москва : Трансжелдориздат, 1939. 192 с.
29. Репях С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск : Лира, 2006. 1056 с.
30. Soares D. F., Abreu M., Barros D., Castro F. Experimental study of the Cu–AlSn phase equilibria, close to the copper zone. *Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy*. 2017. № 53 (3). Pp. 209–213.
31. Влияние легирующих компонентов и примесей на свойства сплавов меди. URL : https://www.sinref.ru/000_uchebniki/03400metalg/010_uvelirnoe_hudojestv_litio_po_modelam_splavov_medi_1991/015.htm (дата звернення: 26.04.2022).
32. Узлов К. И., Реп'ях С. И., Дзюбіна А. В., Кімстач Т. В., Мовчан О. В. Аналіз відповідності нормативних вимог до алюмінієвих бронз закономірностям структуроутворення в системі Cu–Al. *Теорія і практика металургії*. 2019. № 5. С. 48–56.
33. ДСТУ ISO 6892-1:2019. Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Ч. 1. Метод випробування за кімнатної температури (ISO 6892-1:2016, IDT). [Чинний від 2019-11-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2019. 40 с.
34. ISO 148-1:2016. Metallic materials. Charpy pendulum impact test. Part 1: Test method. [Third edition 2016-10-15]. 2016. 29 p. (International standard).
35. ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 Матеріали металеві. Випробування на твердість по Брінеллю. Частина 1. Метод випробування (EN ISO 6506-1:2014, IDT; ISO 6506-1:2014, IDT). [Чинний від 2019-07-01]. ДП «УкрНДНЦ»; Держспоживстандарт України, 2019.
36. Шеффе Генри Дисперсионный анализ : пер. с англ. Б. А. Севастьянова и В. П. Чистякова. Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 512 с.
37. ASTM E3–11. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. 2017. URL : <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astme311> (дата звернення : 23.04.2022).
38. Попилов Л. П., Зайцева Л. П. Электрополирование и электро травление металлографических шлифов. Москва : Металлургия, 1963. 410 с.

REFERENCES

- Ponomarenko O.I., Shinskij I.O. and Morgun N.N. *Lit'e po gazificiruemy`m modelyam bronzovy`x splavov* [Casting on gasified models of bronze alloys]. *Litejnoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 2004, no. 11, p. 30. (in Russian).
- Makarevich O.P., Fedorov G.E. and Platonov E.O. *Virobnictvo vilivkiv iz special'nih stalej* [Production of castings from special steels]. Kyiv : Vid-vo Kyiv. politekhn. in-tu, 2005, 712 p. (in Ukraine).
- Ponomarenko O.I., Lysenko T.V., Stanovskij A.L. and Shinskij. O.I. *Upravlenie litejnymi sistemami i processami: monografiya* [Management of foundry systems and processes : monograph]. Har'kov : Izd-vo Har'k. politekhn. in-ta, 2012, 368 p. (in Russian).
- Mironov A.E., Gershman I.S. and Gershman E.I. *Novye alyuminiyevye antifrikcionnye splavy vzamen bronz dlya monometallicheskih podshipnikov, rabotayushchih v usloviyah granichnogo treniya* [New aluminum antifriction alloys instead of bronzes for monometallic bearings operating under boundary friction conditions]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University]. 2016, no. 4 (52), pp. 22–31. (in Russian).
- Mironov A.E. and Kotova E.G. (Karacharova). *Razrabotka novyh marok litejnyh alyuminiyevyh antifrikcionnyh splavov dlya zameny bronz v uzlah treniya* [Development of new grades of cast aluminum antifriction alloys to replace bronzes in friction units]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2011, vol. 13, no. 4 (3), pp. 1136–1140. (in Russian).
- Tada H., Paris P.C. and Irwin G.R. *The Stress Analysis of Cracks Handbook*. Paris Productions, St. Louis, 1985.
- O neobhodimosti povysheniya kachestva bronzovogo lit'ya* [On the need to improve the quality of bronze casting]. URL : <http://strojkomtech.ru/o-neobxodimosti-povysheniya-kachestva-bronzovogo-litya>. (date of application : 22.04.2022).
- GOST 613-79. *Bronzy olovyannye litejnye* [Tin foundry bronzes]. [Date of introduction : 1980-01-01]. Moscow : IPK Izdatel'stvo Standartov; Mezghosudarstvennyj Standart, 1980, 5 p. (in Russian).
- Smiryagin A.P., Smiryagina N.A. and Belova A.V. *Promyshlennye cvetnye metally i splavy* [Industrial non-ferrous metals and alloys]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1974, 488 p. (in Russian).
- Kimstach T.V., Uzlov K.I., Rep'yah S.I. and Solonenko L.I. *Analiz vplivu riznih seredovishch na korozijnju stijkist' midnih splaviv* [Analysis of the injection of different media on the corrosion resistance of copper alloys]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2021, no. 3 (94), pp. 36–45. (in Ukrainian).
- ASM Metals Handbook. Vol. 03 : Alloy Phase Diagrams. ASM International. URL : http://www.asminternational.org/search/-/journal_content/56/10192/25871543/PUBLICATION. (date of application : 22.04.2022).

12. *Diagrammy sostoyaniya dvoynyh metallicheskih sistem : Spravochnik v 3 t.* [State Diagrams of Binary Metal Systems : Handbook in 3 vol.]. Gen. red. by N.P. Lyakisheva. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1997, vol. 2, 1024 p. (in Russian).
13. Gershman I.S. and Bushe N.A. *Realizaciya dissipativnoj samoorganizacii poverhnostej treniya v tribo sistemah* [Realization of dissipative self-organization of friction surfaces in tribo systems]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear]. 1995, vol. 16, no. 1, pp. 61–70. (in Russian).
14. Arzamasov B.N., Brostrem V.A., Bushe N.A. and oth. *Konstrukcionnye materialy : spravochnik* [Structural materials : reference book]. Gen. ed. by B.N. Arzamasova. Moscow : Mechanical Engineering, 1990, 688 p. (in Russian).
15. Kolachev B.A., Elagin V.I. and Livanov V.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka cvetnyh metallov i splavov: uchebnik dlya vuzov* [Metal Science and Heat Treatment of Non-Ferrous Metals and Alloys : a textbook for universities]. Moscow : MISIS Publ., 2005, 432 p. (in Russian).
16. Makarevich O.P., Fedorov G.E. and Platonov S.O. *Virobnictvo vilivkiv iz special'nih stalej* [Production of castings from special steels.]. Kiyv : Vid-vo Kyiv. politekhn. i-tu, 2005, 712 p. (in Ukrainian).
17. Merkulova G.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka cvetnyh splavov : ucheb. posobie* [Metal Science and Heat Treatment of Non-Ferrous Alloys : textbook. allowance]. Krasnoyarsk : Sib. feder. un-t, 2008, 312 p. (in Russian).
18. Osincev O.E. and Fedorov V.N. *Med' i mednye splavy. Otechestvennye i zarubezhnye marki : spravochnik* [Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands : handbook]. Moscow : Mashinostroenie Publ., 2004, 336 p. (in Russian).
19. Lebedev K.P., Rajnes L.S., Shemtov G.S. and oth. *Litejnye bronzy* [Foundry bronzes]. Leningrad : Mashinostroenie Publ., 1973, 312 p. (in Russian).
20. Aksoya M., Kuzucub V. and Turhanc H. A note on the effect of phosphorus on the microstructure and mechanical properties of leaded-tin bronze. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, vol. 124, iss. 1–2, pp. 113–119.
21. Chervyakova V.V. and Presnyakov A.A. *Slozhnye latuni i bronzy* [Complicated brass and bronze]. Alma-Ata : Nauka Publ., 1974, 262 p. (in Russian).
22. Lunn B. The wear resistance of tin bronzes and related alloys. *Wear*. 1965, no. 8, pp. 401–406.
23. Oda Y., Rimura M. and Nakajima K. Changes in the structure and composition of automobile big-end bearing materials and their relation to bearing failure. *Wear*. 1972, vol. 20, no. 2, pp. 159–164.
24. Pathak J.P. and Tiwari S.N. On the mechanical and wear properties of copperlead bearing alloys. *Wear*. 1992, no. 155 (1), pp. 37– 47.
25. Mysik R.K., Sulicin A.V. and Brusnicyn S.V. *Litejnye splavy na osnove tyazhelyh cvetnyh metallov: uchebnoe posobie* [Casting alloys based on heavy non-ferrous metals : a tutorial]. Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2016, 140 p. (in Russian).
26. ASM Metals Handbook, desk edition, ASM International, 1998, 2571 p.
27. Zaharov A.M. *Promyshlennye splavy cvetnyh metallov* [Industrial alloys of non-ferrous metals]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1980, 256 p. (in Russian).
28. Il'in A.I. *Antifrikcionnye olovyanno-svincovistye bronzy dlya parovozov FD i IS* [Antifriction tin-lead bronzes for steam locomotives FD and IS.]. Moscow : Tranzheldorizdat Publ., 1939, 192 p. (in Russian).
29. Repyah S.I. *Tekhnologicheskie osnovy lit'ya po vyplavlyaemym modelyam* [Technological basics of investment casting]. Dnepropetrovsk : Lira Publ., 2006, 1056 p. (in Ukrainian).
30. Soares D.F., Abreu M., Barros D. and Castro F. Experimental study of the Cu–AlSn phase equilibria, close to the copper zone. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2017, no. 53 (3), pp. 209–213.
31. *Vliyanie legiruyushchih komponentov i primesej na svoystva splavov medi* [Influence of alloying components and impurities on the properties of copper alloys]. URL : https://www.sinref.ru/000_uchebniki/03400metallurg/010_uvelirnoe_hudojestv_litio_po_modelam_splavov_medi_1991/015.htm (date of application : 26.04.2022). (in Russian).
32. Uzlov K.I., Rep'yah S.I., Dzyubina A.V., Kimstach T.V. and Movchan O.V. *Analiz vidpovidnosti normativnih vimog do alyuminiyevih bronz zakonmirnostyam strukturoutvorenniya v sistemi Cu–Al* [Analysis of aluminum bronzes normative requirements compliance with structure formation in Cu–Al system regularity]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2019, no. 5, pp. 48–56. (in Ukrainian).
33. DSTU ISO 6892-1:2019. *Metalevi materialy. Viprobuvannya na roztyag. Chastyna 1. Metod viprobuvannya za kimnatnoy temperaturi* [Metallic Materials. Tensile Tests. Part 1. Test Method at Room Temperature]. (ISO 6892-1:2016, IDT). [Valid from : 2019-11-01]. Kyiv : Derzhspozhivstandart Ukraïni, 2019, 40 p. (in Ukrainian).
34. ISO 148-1:2016. *Metallic materials. Charpy pendulum impact test. Part 1 : Test method* [Third edition 2016-10-15]. 2016, 29 p. (International Standard).
35. DSTU EN ISO 6506-1:2019. *Materialy metalevi. Viprobuvannya na tverdist' po Brinellyu. Chastyna 1. Metod viprobuvannya* [Metallic Materials. Brinell Hardness Test. Part 1. Test Method]. (EN ISO 6506-1:2014, IDT; ISO 6506-1:2014, IDT). [Valid from : 2019-07-01]. Kyiv : SE “UkrNDNC”; Derzhspozhivstandart Ukraïni, 2019. (in Ukrainian).

36. Sheffe Genri *Dispersionnyj analiz* [Analysis of variance]. Trans. from Engl. by B.A. Sevast'yanova and V.P. Chistyakova. Moscow : Nauka Publ.; Main Edition of Physical and Mathematical Literature, 1980, 512 p. (in Russian).

37. ASTM E3-11. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. 2017. URL : <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astme311> (date of application : 23.04.2022).

38. Popilov L.P. and Zajceva L.P. *Elektropolirovanie i elektrotravlenie metallograficheskikh shlifov* [Electropolishing and electroetching of metallographic sections]. Moscow : Metallurgizdat Publ., 1963, 410 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 03.05.2022.