

УДК 691.73:621.74.011

<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2021.05>**Кімстач Т.В., Узлов К.І., Реп'ях С.І., Мазорчук В.Ф., Усенко Р.В., Іванова Л.Х.**  
**Фізичні та ливарні властивості сплавів системи Cu-Sn-Al****Kimstach T.V., Uzlov K.I., Repyakh S.I., Mazorchuk V.F., Usenko R.V., Ivanova L.H.**  
**Physical and foundry properties of Cu-Sn-Al system alloys**

**Анотація. Мета.** Визначення фізичних та ливарних властивостей олов'яно-алюмінієвої бронзи, що містить Sn – до 6,73 % та Al – до 7,53 %, за масою.

**Методика.** Плавки проводили у графітовому тиглі в індукційній печі під шаром деревного вугілля. Температуру ліквідус і солідус сплавів визначали за результатами термографування розплаву, що твердіє. Величину вільної ( $\alpha_c$ ) та абсолютно утрудненої ( $\alpha_{A3}$ ) лінійної усадки та температуру переходу сплаву з пластичного в пружний стан при охолодженні в ливарній формі визначали за загальноприйнятими методиками. Рідкоплинність бронз оцінювали довжиною заповненого каналу спіральної проби за ГОСТ 16438. Оцінку схильності бронзи BrO3A3 до пригару та до утворення гарячих і холодних тріщин здійснювали за результатами візуального дослідження поверхні зразків. Питому щільність литої бронзи визначали розрахунковим шляхом. Механічні властивості досліджуваних сплавів розраховували за результатами випробувань відповідних зразків при їх ударному вигині при кімнатній температурі відповідно до діючих стандартів. Контроль хімічного складу сплавів здійснювали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L на зразках, вирізаних з тріфазових проб. Мікροструктурні дослідження проводили на металографічних мікрошліфах, приготовлених за стандартними методиками на оптичному мікроскопі Neophot-21. Величину достовірності апроксимації та відповідні залежності будували з використанням комп'ютерної програми EXEL.

**Результати.** За якісними та кількісними показниками та оцінки фізичних та ливарних властивостей бронз системи Cu-Sn-Al із вмістом Sn до 6,73 % та Al до 7,53 %, визначено, що з числа можливого вмісту олова і алюмінію в системі Cu-Sn-Al найбільш перспективною є бронза з 3...4% (мас.) кожного з зазначених легуючих компонентів.

**Наукова новизна.** Вперше визначено ряд фізичних та ливарних властивостей бронз системи Cu-Sn-Al із вмістом Sn до 6,73 % та Al до 7,53 %. Вперше встановлено, що лінійна усадка таких бронз, температура переходу з пластичного в пружний стан при охолодженні після затвердіння та величина ударного вигину при нормальній температурі залежать від їх структури, тобто від фазового складу, який визначається вмістом в бронзі її легуючих елементів.

**Практична значимість.** За результатами досліджень фізичних та ливарних властивостей бронзу BrO3A3 рекомендовано використовувати як ливарний матеріал.

**Ключові слова:** бронза, ліквідус, солідус, усадка, температура переходу із пластичного в пружний стан, уявна щільність, ударний вигин

**Abstract. Purpose.** Tin-aluminum bronze containing Sn - up to 6.73% and Al - up to 7.53% (by weight) physical and casting properties determination.

**Methodology.** Melting has been carried out in graphite crucible in induction furnace under charcoal layer. Alloys liquidus and solidus temperatures have been investigated by thermography results of solidifying melt. Free ( $\alpha_c$ ) and absolutely difficult ( $\alpha_{A3}$ ) linear shrinkage values and alloy transition temperature from plastic to elastic state during cooling in mold have been studied by conventional methods. Bronzes fluidity has been estimated by the spiral sample filled channel length according to GOST 16438. Bronze BrO3A3 tendency to burn and to hot and cold cracks formation has been evaluated by samples surface visual examination results. Cast bronze specific density has been determined by calculation. Studied alloys mechanical properties have been calculated based on corresponding samples tests results at their impact bending at room temperature in accordance with actual standards. Alloys chemical composition control has been carried out on precision analyzer EXPERT 4L on specimens cut from club-shaped samples. Microstructural studies have been performed on metallographic microscopic samples prepared by standard methods on optical microscope Neophot-21. Approximation reliability value and corresponding dependences have been built using EXEL computer program.

**Results.** According to qualitative and quantitative indicators and system Cu-Sn-Al bronzes with Sn content up to 6.73% and Al content up to 7.53% physical and foundry properties assessments, it has been determined that among possible tin and aluminum content in Cu-Sn-Al the most promising is bronze with 3...4% (by weight) of these alloying components each.

**Originality.** For the first time number of physical and foundry properties of Cu-Sn-Al system bronze (with Sn content up to 6.73% and Al up to 7.53%) have been determined. It has been first established that such bronzes linear shrinkage, transition temperature from plastic to elastic state during cooling after solidifying and impact bending value at normal temperature depend on their structure, i.e. phase composition determined by its alloying elements content in bronze.

**Practical value.** According to studies of physical and foundry properties results, bronze BrO3A3 has been recommended to be used as casting material.

**Keywords:** bronze, liquidus, solidus, shrinkage, temperature of transition from plastic to elastic state, specific density, impact toughness

**Вступ.** Одним з основних завдань досліджень у галузі ливарного виробництва є підвищення якості та властивостей литих деталей, в тому числі, з ко-

льорових сплавів, як найбільш дорогих матеріалів. Тому розробка технологічних та теоретичних основ підвищення фізичних та ливарних властивос-

Кімстач Тетяна Володимирівна – ст. викладач УДУНТ,  
Узлов Костянтин Іванович – д.т.н., проф. УДУНТ,  
Реп'ях Сергій Іванович – д.т.н., с.д. УДУНТ,  
Мазорчук Володимир Федорович – к.т.н., доц. УДУНТ,  
Усенко Руслан Вікторович – к.т.н., доц. УДУНТ,  
Іванова Людмила Харитонівна – д.т.н., проф. УДУНТ

Tetyana Kimstach - senior lecturer at USUST  
Uzlov Kostyantyn - d.t.s. Prof. USUST  
Serhiy Repyakh – d.t.s., USUST  
Volodymyr Mazorchuk – c.t.s. Assoc. USUST  
Ruslan Usenko – c.t.s. Assoc. USUST  
Ivanova Lyudmila - d.t.s. Prof. USUST

тей ливарних сплавів на основі міді, їх прогнозування та способів керування ними є завжди своєчасною та актуальною задачею.

Властивості литих бронз багато в чому визначаються їх складом та умовами кристалізації. При цьому, їх механічні, ливарні, технологічні, експлуатаційні, споживчі та інші властивості ніяким чином автори відомих досліджень не пов'язують між собою. Це ускладнює процес вибору будь якого сплаву під конкретні умови його експлуатації та не дозволяє прогнозувати зміни його властивостей, зокрема механічних, при змінах хімічного складу майже в межах його марки. Як результат, та чи інша бронза може стати причиною аварійної ситуації або виходу з ладу будь якого механізму в складі якого використовують таку литу деталь.

В зв'язку з цим, дослідження, які присвячені пошуку зв'язків фізичних та ливарних властивостей ливарних бронз з їх хімічним складом та структурою є актуальними.

**Стан питання.** На даний час з числа відомих бронз найбільшого поширення у ливарному виробництві набули олов'яні бронзи із вмістом олова до 10% (мас) [1]. Це зумовлено поєднанням в таких бронзах достатньо високих ливарних, механічних, триботехнічних та експлуатаційних властивостей.

Серед мідних сплавів олов'яні бронзи мають найнижчу лінійну усадку (0,8 % при литті в піщану форму та 1,4 % при лиття в кокіль). Це дозволяє отримувати складні за конфігурацією фасонні виливки з чітким відтворенням рельєфу робочої порожнини ливарної форми і, саме головне, виливки без тріщин з різкими переходами від товстих перерізів до тонких [2, 3].

Однією з особливостей олов'яних бронз є великий інтервал кристалізації ( $\Delta T_{кр} = 150...200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [3]. З цієї причини в виливках з таких бронз не утворюється концентровані усадкові раковини, а виникає розсіяна дрібна пористість, що знижує герметичність литих деталей. Завдяки широкому інтервалу кристалізації, рідкоплинність олов'яних бронз значно нижче ніж алюмінієвих або кремнієвих бронз. При цьому, серед олов'яних бронз мінімальну рідкоплинність мають сплави, що містять 10...12% (мас.) олова, що відповідає максимальному інтервалу кристалізації для цих сплавів [2].

У масивних стінках виливків та злитках олов'яні бронзи схильні до «зворотної ліквіації». Це пов'язано з тим, що при кристалізації легкоплавка складова бронз, збагачена оловом, під впливом об'ємних змін і газів, що виділяються, переміщується від центру до периферії. Тому, в деяких випадках при значно вираженій «зворотній ліквіації» на поверхні виливків та злитків утворюється так званий «олов'яний піт» у вигляді білих плям чи виділень. Ці виділення крихкі, містять 15...18% (мас.) Sn, складаються з кристалів  $\delta$ -фази і негативно впливають на якість виливків [4].

У злитках зі сплавів системи Cu–Sn під час кристалізації також розвивається значна внутрішньо-

дендритна ліквіація яка зникає лише після багаторазової обробки тиском та термічної обробки злитка, що ускладнює технологічний процес обробки тиском даних сплавів [4, 5].

Олов'яні бронзи мало чутливі до перегріву і впливу газів, відмінно сприймають зварювання і паяння, не дають іскри при ударах, немагнітні, морозостійкі і мають високі антифрикційні властивості [4].

Відповідно до ГОСТ 613 механічні властивості ливарних олов'яних бронз змінюються у наступних межах: тимчасовий опір при розтягуванні 140...250 МПа, відносне подовження 4...12 %, твердість HB 441...882 МПа.

З метою зниження вартості литих деталей та надання бронзам потрібного рівня деяких властивостей в ливарних бронзах прагнуть повністю чи частково зменшити вміст олова замінюючи його менш коштовними металами (Zn, Ni, Pb). Для поліпшення механічних, технологічних та службових характеристик олов'яні бронзи додатково легують фосфором [2].

Найбільшого поширення серед ливарних безолов'яних бронз набули алюмінієві бронзи, які у порівнянні з олов'яними бронзами мають певні переваги, а саме: меншу схильність до дендритної ліквіації, велику щільність у виливках, кращу рідкоплинність, більш високу міцність, жароміцність і стійкість (корозійну, кавітаційну), меншу схильність до холодноламкості [6].

Висока рідкоплинність сплавів системи Cu–Al обумовлена малим інтервалом їх кристалізації (13...46  $^{\circ}\text{C}$ ). Однак, вузький інтервал кристалізації призводить до утворення у виливках концентрованих усадкових раковин. Ця обставина викликає необхідність встановлення на виливках значних за об'ємом надливів та дотримання принципу послідовного затвердіння їх сполучних між собою елементів під час проектування конструкції як самого виливка, так і його ливниково-живлючої системи.

Лінійна усадка цих сплавів при виготовленні виливків досягає 2,0...2,2%, що підвищує вірогідність виникнення у фасонних виливках гарячих тріщин [2]. Крім того, алюмінієві бронзи схильні до інтенсивного окислення в розплавленому стані та до поглинання газів, що стає причиною виникнення у виливках спайів та, у ряді випадків, зниженої герметичності литих деталей.

Характерною особливістю подвійних сплавів Cu–Al є їх схильність до так званого самовідпалу при повільному затвердінні (при литті в піщані ливарні форми), що призводить до зростання розмірів зерна в структурі. Для запобігання самовідпалу в алюмінієві бронзи та, відповідно, з метою підвищення рівня її механічних властивостей, в неї додають залізо [1]. Для одночасного покращення механічних, технологічних властивостей та корозійної стійкості алюмінієві бронзи додатково легують Mn та Ni.

З викладеного вище витікає, що для можливого поєднання переваг в частині рівня потрібних влас-

тивостей як олов'яних так і алюмінієвих бронз доцільно дослідити фізичні та ливарні властивості сплавів сумісної системи Cu-Sn-Al, відомості про які на сьогодні відсутні.

**Мета та завдання досліджень.** Мета досліджень – визначення фізичних та ливарних властивостей олов'яно-алюмінієвої бронзи, що містить Sn – до 6,73 % та Al – до 7,53 %, за масою. Завдання досліджень – визначення питомої щільності бронзи при нормальній температурі, температуру солідус і ліквідус, температуру переходу литої бронзи з пластичного в пружний стан при її охолодженні в ливарній формі, оцінка схильності бронзи до появи у виливках тріщин і пригару на їх поверхні при заливанні в піщано-рідкоскляну ливарну форму, визначення величини вільної та абсолютно утрудненої лінійної усадки литої бронзи, встановлення зв'язку лінійної усадки бронзи від вмісту в ній легуючих елементів та величини показника міцності при ударному вигині за нормальної температури.

**Методика досліджень.** У дослідженнях для приготування експериментальних бронз використовували мідь М2, олово марки О2, алюміній марки А6, залізо – сталь марки Ст3, цинк марки Ц1,

свинець марки С3. Плавки проводили у графітовому тиглі металоемністю 5 кг (по міді) в індукційній печі під шаром деревного вугілля. Температуру розплаву вимірювали W-Mo термопарою у комплекті з електронним потенціометром КСП-4. На прикінці плавки розплави олов'яних БрО5Ц5С5 (ГОСТ 613) та безолов'яних бронз БрА9ЖЗЛ (ГОСТ 493) розкислювали фосфористою міддю. Розплави бронз системи Cu-Sn-Al при плавках не розкислювали.

Температуру ліквідус і солідус сплавів визначали за результатами термографування розплаву, що твердіє, для чого незахищений гарячий спай хромель - алюмелевої термопари діаметром 0,5 мм до заливки розміщували в ливниковій воронці ливарної форми. Реєстрацію температури проводили електронним потенціометром марки АТ4208.

Зразки для досліджень виготовляли шляхом заливки розплаву бронзи з перегрівом 100...120 °С у сталеві (сталь Ст3) кокілі з гладкою та ребристою робочою поверхнею, які мали початкову температуру 100...110 °С. Вигляд робочих поверхонь використаних кокілів представлено на рис. 1.

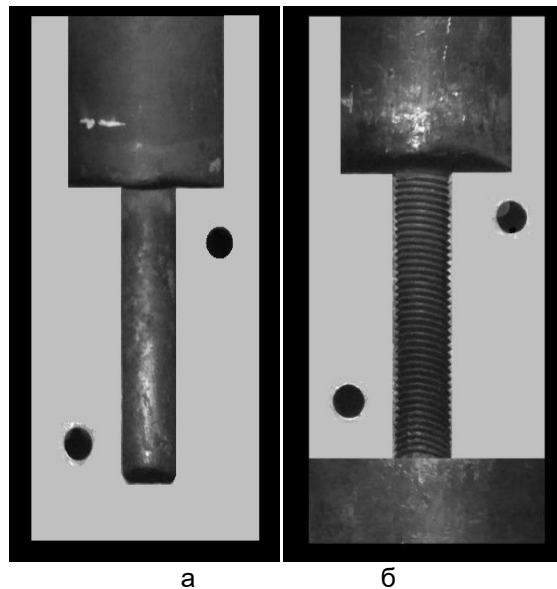


Рисунок 1. Вигляд робочих поверхонь гладкого (а) та ребристого (б) кокілей

Величину вільної ( $\alpha_c$ ) та абсолютно утрудненої ( $\alpha_{A3}$ ) лінійної усадки визначали на зразках  $\varnothing 16 \times 85$  мм, які виготовляли та заміряли за методикою роботи [7].

Відповідно до [7] залитий в гладкий кокіль зразок витягували з кокілю після 5...7 с з моменту закінчення заливки і охолоджували на повітрі. Залитий в ребристий кокіль зразок витягували з кокілю через 24 години з моменту закінчення заливки та його охолодження з кокілем на повітрі.

Після досягнення зразками нормальної температури проводили замірювання їх довжини за допомогою електронного штангенциркуля, який за-

безпечував похибку вимірювання не більше 0,01 мм. Величину лінійної усадки отриманих зразків розраховували за формулою, %:

$$\alpha = 100 \frac{l_k - l_0}{l_k}, \quad (1)$$

де  $l_k$ ,  $l_0$  – довжини робочої порожнини кокілю і довжина зразка відповідно, мм.

У порівняльних дослідженнях зі схильності бронз до утворення пригару та на рідкоплинність використовували бронзи: перспективна БрО3А3, БрО5Ц5С5 та БрА9ЖЗЛ.

Оцінку схильності до пригару проводили візуально щодо наявності пригару та його товщини на поверхні циліндричних зразків бронзи  $\varnothing 30 \times 120$  мм відлитих у піщано-рідкоскляну форму (ПРФ) схема та загальний вигляд якої представлено на рис. 2.

Для виготовлення ПРФ використовували суміш кварцового піску, що містить глину до 0,1% і 2,5%

(за масою) рідкого натрієвого скла питомою щільністю  $1,42 \text{ г/см}^3$  і силікатним модулем 2,9. Такі форми виготовляли шляхом структурування кварцового піску, плакованого рідким склом у паромікрохвильовому середовищі відповідно до методики роботи [8].

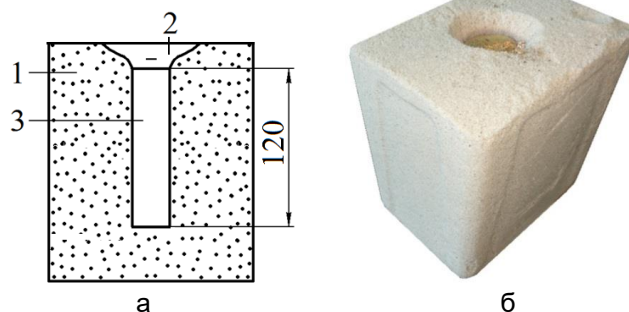


Рисунок 2. Схема ПРФ для виготовлення зразків циліндричної форми  $\varnothing 30 \times 120$  мм (а) та загальний вигляд залитої ПРФ (б): 1 – ливарна форма; 2 – ливникова воронка; 3 – робоча порожнина ПРФ

Для виготовлення ПРФ проводили сушіння плакованого кварцового піску та його структурування мікрохвильовим випромінюванням із частотою 2,45 ГГц в печі з магнетроном потужністю 700 Вт, відповідно, на повітрі та у середовищі насиченої водяної пари масою 1 г з розрахунку на 1 кг плакованого кварцового піску.

Рідкоплинність бронз оцінювали довжиною заповненого каналу спіральної проби за ГОСТ 16438. В іспитах розплави бронз з перегрівом  $130 \dots 150 \text{ }^\circ\text{C}$  заливали в форми з сирію піщано-глинистої суміші, що попередньо були підсушені на повітрі впродовж 24 годин.

Схильність бронзи БрОЗА3 до утворення гарячих та холодних тріщин оцінювали за результатами візуального (при збільшенні  $\times 4$ ) дослідження поверхні зразків, відлитих в коїль з ребристою робочою поверхнею. Бронзу вважали схильною до утворення тріщин у разі виявлення хоча б слідів виходу тріщини на будь-якій її поверхні.

Температуру переходу сплаву з пластичного в пружний стан при охолодженні в ливарній формі визначали за методикою [7] та розраховували за формулою:

$$t_{\text{пп}} = t_s \cdot \frac{\alpha_{\text{A3}}}{\alpha_c}, \quad (2)$$

де температура солідус ( $t_s$ ) вказана у градусах Цельсія.

Питому щільність литої бронзи визначали розрахунком після визначення маси зразків ( $M_0$ ) зважуванням та розрахунку їх об'єму ( $U_0$ ) при  $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  в результаті вимірів габаритних розмірів за формулою:

$$\rho = M_0 / U_0. \quad (3)$$

Вимірювання розмірів у роботі проводили штангенциркулем з точністю 0,01 мм.

Зразки ( $10 \times 10 \times 55$  мм) для випробувань бронзи на ударний вигин виготовляли механічним шляхом з тріфевидних проб за ISO 148-1:2016, отриманих заливкою розплаву бронзи в ПРФ. Випробування зразків на ударний вигин проводили за нормальної температури на маятниковому копрі марки PSW 30.

Контроль хімічного складу сплавів здійснювали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L на зразках, вирізаних з проб.

Мікроструктурні дослідження проводили на металографічних мікрошліфах, приготовлених за стандартними методиками [9...11] на оптичному мікроскопі Neophot-21.

Для встановлення взаємозв'язку між показником вільної лінійної усадки, вмістом в бронзі легуючих елементів використали комплексний показник ( $K_x$ ):

$$K_x = \frac{Al}{(0,01 + Al + Sn)^{0,25}} + \frac{Sn}{(0,01 + Al + Sn)^{0,0001}}, \quad (4)$$

де Al, Sn – масовий вміст алюмінію та олова в бронзі відповідно, %.

За результатами визначення величин досліджуваних параметрів та розрахунку  $K_x$  величину достовірності апроксимації  $R^2$  та відповідні залежності будували з використанням комп'ютерної програми EXEL.

**Результати досліджень.** Вміст легуючих елементів досліджуваних бронз, розрахункові значення коефіцієнта  $K_x$ , величина ударного вигину при кімнатній температурі, вільна та абсолютно утруднена лінійна усадка міді та її сплавів з Sn (до 6,73 %) і Al (до 7,53 %), визначених відповідно до прийнятої у роботі методики, наведено у табл. 1.

Залежності вільної та абсолютно утрудненої лінійної усадки міді та її сплавів від величини  $K_X$  та ударного вигину при кімнатній температурі, побу-

довані за даними табл. 1, представлені на рис. 3 та рис. 4.

Таблиця 1

Вміст легуючих елементів (Al, Sn – мас. %), коефіцієнт  $K_X$ , величина ударного вигину при кімнатній температурі (KCU), вільна ( $\alpha_B$ ) та абсолютно утруднена ( $\alpha_{AY}$ ) лінійна усадка міді та її сплавів з Al та Sn

|                         |       |      |      |      |      |      |
|-------------------------|-------|------|------|------|------|------|
| Al, %                   | 3,77  | 4,18 | 3,86 | 3,11 | 7,53 | 1,02 |
| Sn, %                   | 4     | 4,46 | 3,86 | 1,42 | 0    | 1,30 |
| $K_X$                   | 6,257 | 6,9  | 6,18 | 3,55 | 4,55 | 2,13 |
| $\alpha_B$ , %          | 1,27  | 1,24 | 1,34 | 1,69 | 1,53 | 1,9  |
| $\alpha_{AY}$ , %       | 0,39  | 0,35 | 0,44 | 0,68 | 0,75 | 0,58 |
| $t_S$ , °C              | 968   | 957  | 971  | 1033 | 1042 | 1043 |
| $t_{пп}$ , °C           | 297   | 270  | 319  | 416  | 511  | 318  |
| KCU, Дж/см <sup>2</sup> | 55    | 45   | 68   | 172  | 137  | 182  |
| Al, %                   | 0     | 6,32 | 2,31 | 0    | 5,64 | 1,47 |
| Sn, %                   | 6,73  | 1,37 | 6,76 | 0    | 2,57 | 3,30 |
| $K_X$                   | 6,73  | 5,16 | 8,09 | 0    | 5,90 | 4,49 |
| $\alpha_B$ , %          | 1,27  | 1,46 | 1,16 | 2,3  | 1,45 | 1,55 |
| $\alpha_{AY}$ , %       | 0,35  | 0,66 | 0,33 | 0,46 | 0,52 | 0,75 |
| $t_S$ , °C              | 935   | 1013 | 931  | 1083 | 987  | 992  |
| $t_{пп}$ , °C           | 258   | 458  | 265  | 217  | 354  | 480  |
| KCU, Дж/см <sup>2</sup> | 49    | 105  | 22   | 197  | 75   | 150  |

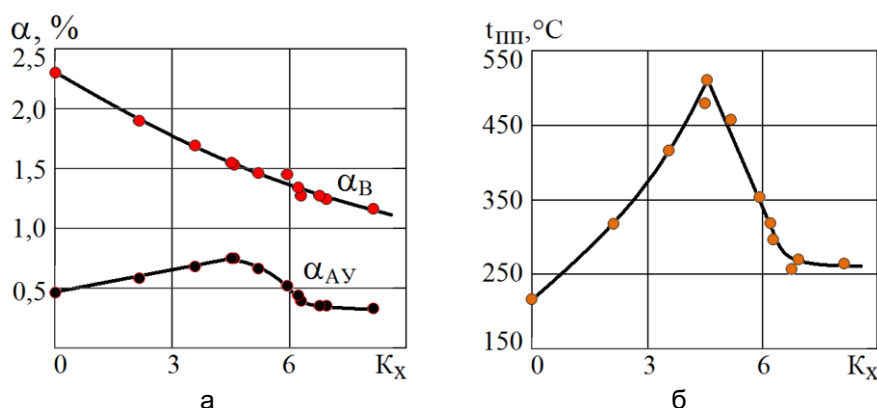


Рисунок 3. Залежність вільної та абсолютно утрудненої лінійної усадки міді та її сплавів (а), а також температури переходу бронзи з пластичного в пружний стан (б) від величини  $K_X$

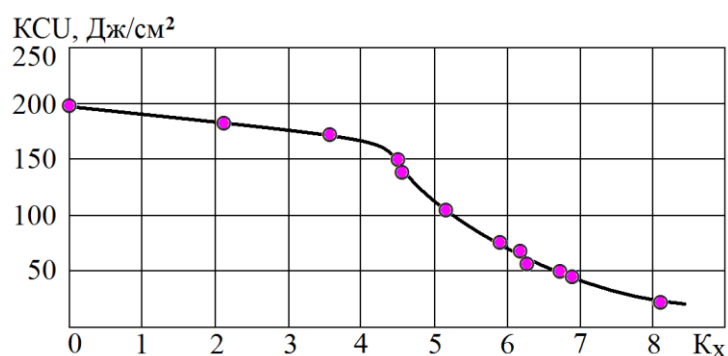


Рисунок 4. Залежність ударного вигину від величини  $K_X$

Рівняння регресії залежності  $\alpha_B = f(K_X)$ , представленої на рис. 3,а та розрахованої за програмою Excel, при величині достовірності апроксимації  $R^2=0,989$  має вигляд:

$$y = 2,3013 - 0,1976 \cdot x + 0,0068 \cdot x^2. \quad (5)$$

Аналіз залежностей на рис. 3 і рис. 4 показує, що між досліджуваними параметрами та комплексним показником хімічного складу системи Cu-Sn-Al існує тісний зв'язок. При цьому, слід зазначити, що у залежностей  $\alpha_{Au}$ ,  $t_{пп}$ ,  $KCU = f(K_x)$  спостерігаються три ділянки, на яких кардинально змінюється характер перебігу залежностей. Щодо показника  $K_x$  це (див. рис. 3 та рис. 4): ділянка (I) –  $0 \leq K_x \leq 4,5$ ; ділянка (II) –  $4,5 < K_x \leq 7,0$ ; ділянка (III) –  $K_x > 7,0$ . Зміни характеру

поведінки зазначених вище залежностей при переході від ділянки I до ділянки II та від ділянки II до ділянки III, які спостерігаються на рис. 3 та рис. 4, очевидно, зумовлені різним фазовим складом досліджених бронз відповідно до специфічної кінетики структуроутворення сплавів в кожному з розглянутих випадків. Про це свідчать результати мікроструктурних досліджень відповідних бронзових зразків, результати яких представлені на рис. 5.

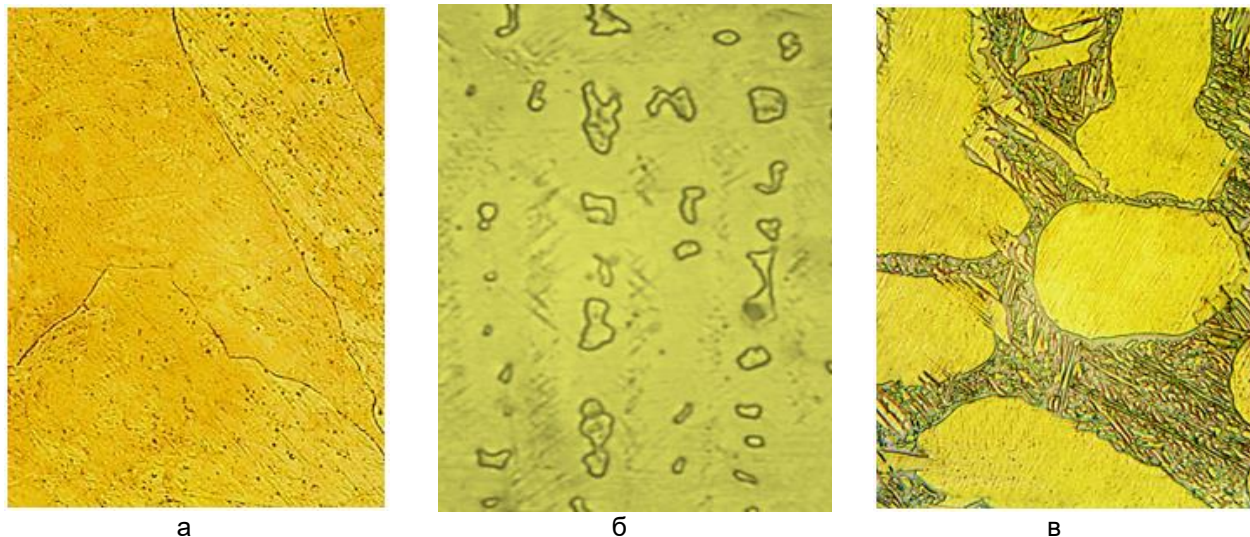


Рисунок 5. Мікроструктури ( $\times 1000$ ) бронз з величиною  $K_x=2,4$  (а),  $K_x=4,9$  (б),  $K_x=7,6$  (в)

Дані мікроструктурного аналізу свідчать про те, що всі три бронзи при незначному вмісті основних компонентів (алюмінію, олова або алюмінію з оловом сумісно), тобто сплави з показником  $0 \leq K_x \leq 4,5$ , мають однофазну структуру  $\alpha$ -Cu твердого розчину (див. рис. 5 а). У сплавах із розміром показника  $4,5 < K_x \leq 7,0$  зафіксована двофазна структура  $\alpha$ -Cu твердого розчину та стабілізованою у метастабільній для неї області діаграми фазових рівноваг високотемпературною  $\beta$ -фазою (див. рис. 5 б). Фазові переходи при формуванні цієї високотемпературної проміжної хімічної сполуки у трикомпонентній системі Cu-Sn-Al більш складні і пов'язані із послідовною реалізацією евтектико-перитектичних перетворень із початковим домінуванням структуроутворення за системою фазових рівноваг компонентів Cu-Al, а далі – Cu-Sn. Така закономірність більш детально буде розглянута у наступних роботах, присвячених безпосередньо вказаному об'єкту дослідження. Сплави з  $K_x > 7,0$  демонструють наявність евтектоїдної складової у структурних ділянках

вихідних  $\beta$ -фаз. Тобто, у сплавах з'являється ще одна, третя фаза як продукт трифазної реакції:  $\beta$ -Cu<sub>5</sub>Sn  $\rightarrow$   $\alpha$ -Cu +  $\delta$ -Cu<sub>31</sub>Sn<sub>8</sub>. Відомо [12], що ці додаткові продукти твердофазних перетворень мають здебільшого складні, низького класу симетрії та в декілька разів більший параметр решітки ніж  $\alpha$ -Cu матриця. Такий природний процес закономірно впливає на показники фізичних, механічних та експлуатаційних властивостей, які наразі вивчаються у наявній роботі.

З точки зору раціональності величин фізичних і ливарних властивостей, що визначаються (див. рис. 3 і рис. 4), то з числа можливого вмісту олова і алюмінію в системі Cu-Sn-Al найбільш перспективною є бронза з 3 ... 4% (за масою) кожного з зазначених легуючих компонентів, що відповідає величині  $K_x=4,9 \dots 6,3$ .

Вигляд вибитих із ПРФ зразків із бронзи БрО3А3, БрО5Ц5С5 та БрА9Ж3Л, а також зразків із бронзи БрО3А3, відлитих у кокіль, представлений на рис. 6.

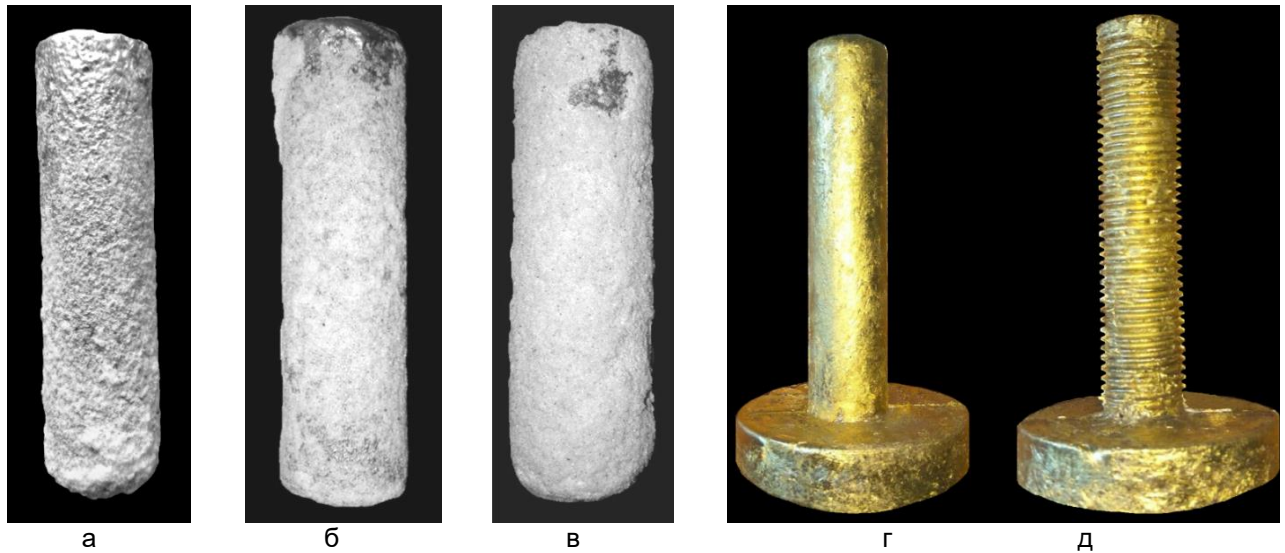


Рисунок 6. Вигляд зразків з бронзи БрО3А3 (а), БрО5Ц5С5 (б), БрА9Ж3Л (в) після вибивання з ПРФ форми та зразків з бронзи БрА3О3, відлитих в гладкий (г) та ребристий (д) кокіль

Аналіз зображень на рис. 6 показує, що на поверхні зразків із бронзи БрО3А3 (див. рис. 6,а), як і на поверхні зразків із бронзи БрО5Ц5С5 (див. рис. 6,б) та БрА9Ж3Л (див. рис. 6,в) при їх заливанні у ПРФ спостерігається легко відокремлюваний від зразків термічний пригар. У той же час, при литті у сталевий кокіль з чистою робочою поверхнею зразки з бронзи БрО3А3 характеризуються гладкою поверхнею (див. рис. 6, г) і чітким рельєфом поверхні (див. рис. 6, д). При цьому, у зразка, що був

отриманий у кокіль з ребристою робочою поверхнею, відсутні будь-які (холодні, гарячі) тріщини, що свідчить про відсутність схильності даної бронзи до утворення холодних і гарячих тріщин під час затвердіння та охолодження в ливарній формі в умовах утрудненої усадки.

Рідкоплинність бронз БрО3А3, БрО5Ц5С5 і БрА9Ж3Л представлена у вигляді діаграми на рис. 7.

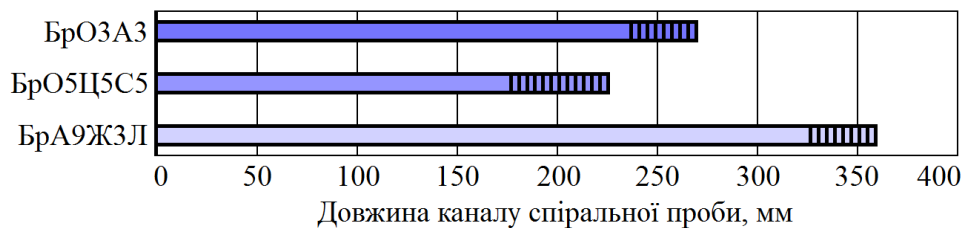


Рисунок 7. Рідкоплинність бронз по спіральній пробі, виготовленої з ПРФ

Аналіз діаграми на рис. 7 свідчить, про те, що рідкоплинність бронзи БрО3А3 менша за рідкоплинність бронзи БрА9Ж3Л, але більша за рідкоплинність олов'яної бронзи БрО5Ц5С5. Ця закономірність пояснюється вирішальним впливом інтервалу кристалізації досліджуваних сплавів на їхню рідкоплинність. Тобто, отриманий результат підтверджує відомий в ливарному виробництві факт про те, що зі збільшенням інтервалу кристалізації, за інших рівних умов, рідкоплинність сплавів зменшується [1,4,5].

За результатами досліджень встановлено, що для бронзи БрО3А3:

- температура ліквідус ( $t_L$ ) – 1037...1050 °C;
- температура солідус ( $t_S$ ) – 955...997 °C;
- абсолютно утруднена лінійна усадка ( $\alpha_{\text{Л}}$ ) – 0,39...0,43%;

- вільна лінійна усадка ( $\alpha_B$ ) – 1,31...1,49%;
- температура переходу із пластичного в пружний стан ( $t_{\text{П}}$ ) – 255...305 °C;
- уявна щільність при нормальній температурі – 8500±50 кг/м<sup>3</sup>;
- ударний вигін (КСУ) – 50...120 Дж/см<sup>2</sup>.

Всі вищезазначені якісні оцінки литих зразків свідчать про досить високий рівень ливарних та технологічних властивостей бронзи БрО3А3 як ливарного матеріалу.

**Висновки.** Вперше визначено ряд фізичних та ливарних властивостей бронз системи Cu-Sn-Al із вмістом Al до 7,53 % та Sn до 6,73 %. Вперше встановлено, що лінійна усадка таких бронз, температура переходу з пластичного в пружний стан при охолодженні після затвердіння та величина ударного вигину при нормальній температурі за-

лежать від їх структури, тобто від фазового складу, який визначається вмістом в бронзі її легуючих елементів.

Всі отримані в цих дослідженнях якісні та кількісні показники та оцінки фізичних та ливарних властивостей бронзи БрОЗА3 свідчать про їх до-

сить високий рівень. У зв'язку з цим бронзу БрОЗА3, яка формально за концентрацією основних компонентів відноситься до категорії таких, що деформуються, можна рекомендувати як ливарний матеріал.

### Бібліографічний опис

1. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник для вузов. / А.В. Курдюмов, М.В. Пикунов, В.М. Чурсин, Е.Л. Бибииков. 2-е изд., доп. и перераб. Москва : МИСИС, 1996. 504 с.
2. Мысик Р.К., Сулицин А.В., Брусницын С.В. Литейные сплавы на основе тяжелых цветных металлов: учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. 140 с.
3. Материаловедение : учебник для вузов. / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. 8-е издание, стереотип. Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.
4. Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы. 3-е изд. Москва : Металлургия, 1974, 488 с.
5. Меркулова Г.А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов: учеб. пособие. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2008. 312 с.
6. Алюминиевые бронзы. URL: [https://vuzlit.com/2086363/alyuminievye\\_bronzy](https://vuzlit.com/2086363/alyuminievye_bronzy).
7. Ливарні властивості металів і сплавів для прецизійного лиття: підручник для вищих навчальних закладів. / В.О. Богуслав, С.І. Реп'ях, В.Г. Могилатенко, З.А. Івченко та ін.; під ред С.І. Реп'яха та В.Г. Могилатенка: 2-е вид. доп. та доопр. Запоріжжя: АТ "МОТОР СІЧ", 2016. 474 с.
8. Solonenko L.I., Repiakh S.I., Uzlov K.I., Mamuzich I., Kimstach T.V., Bilyi O.P. Kinetics of quartz sand and its mixtures drying by microwave radiation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 1. С. 68-77.
9. ASTM E3 – 11 (2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.
10. Коваленко В.С. Металлографические реактивы / В.С. Коваленко. Москва : Металлургия, 1981. 120 с.
11. Беккерт М. Способы металлографического травления : справочное издание. Перевод с нем. / М. Беккерт, Х. Клемм. Москва : Металлургия, 1988. 400 с.
12. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник в 3-х томах / Под ред. Н.П. Лякишева. Москва : Машиностроение, 2001.

### References

1. *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnykh metallov: uchebnik dlya vuzov*. [Production of castings from non-ferrous alloys: a textbook for universities] / A.V. Kurdyumov, M.V. Pikunov, V.M. Chursin, E.L. Bibikov. 2-e izd., dop. i p?ererab. Moskva : MISIS, 1996. 504 p.
2. Mysik R.K., Sulicin A.V., Brusnicyn S.V. *Litejnye splavy na osnove tyazhelykh cvetnykh metallov: uchebnoe posobie*. [Casting alloys based on heavy non-ferrous metals: a tutorial] Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2016. 140 p. (in Russian).
3. *Materialovedenie : uchebnik dlya vuzov*. [Materials science: a textbook for universities] / B.N. Arzamasov, V.I. Makarova, G.G. Muhin i dr.; pod obshch. red. B. N. Arzamasova, G.G. Muhina. 8-e izdanie, stereotip. Moskva : Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman, 2008. 648 p.
4. Smiryagin A.P., Smiryagina N.A., Belova A.V. *Promyshlennyye cvetnyye metally i splavy* [Industrial non-ferrous metals and alloys]. Moskva : Metallurgiya, 1974. 488 p.
5. Merkulova G.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka cvetnykh splavov: ucheb. posobie* [Metal science and heat treatment of non-ferrous alloys: textbook. allowance]. Krasnoyarsk : Sib. feder. un-t, 2008. 312 p.
6. Alyuminievye bronzy. [Aluminum bronzes.]. URL: [https://vuzlit.com/2086363/alyuminievye\\_bronzy](https://vuzlit.com/2086363/alyuminievye_bronzy).
7. *Lyvarni vlastyvosti metaliv i splaviv dlia pretsyziinoho lyttia: pidruchnyk dlia vyshchykh uchbovykh zakladiv*. [Foundry properties of metals and alloys for precision casting: a textbook for higher education institutions] / V.O. Bohuslaiev, S.I. Repiakh, V.H. Mohylatenko, Z.A. Ivchenko ta in.; pid red S.I. Repiakha ta V.H. Mohylatenka: 2-e vyd. dop. ta doopr. Zaporizhzhia: AT "MOTOR SICH", 2016. 474 p.
8. Solonenko L.I., Repiakh S.I., Uzlov K.I., Mamuzich I., Kimstach T.V., Bilyi O.P. Kinetics of quartz sand and its mixtures drying by microwave radiation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 1. P. 68-77.
9. ASTM E3 – 11 (2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.
10. Kovalenko V.S. *Metallograficheskie reaktivy* [Metallographic reagents] / V.S. Kovalenko. Moskva : Metallurgiya, 1981. 120 p.
11. Bekkert M. *Sposoby metallograficheskogo travleniya :spravochnoe izdanie*. [Methods of metallographic etching: a reference book.] Perevod s nem. / M. Bekkert, H. Klemm. Moskva.: Metallurgiya, 1988. 400 p.
12. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem: spravochnik v 3-h tomah* [State Diagrams of Binary Metal Systems: A Handbook in 3 Volumes] / Pod red. N.P. Lyakisheva. Moskva : Mashinostroenie, 2001.