DOI 10.34185/1562-9945-2-157-2025-14
УДК 691.73:669.35:621.74.043:620.17

Т.В. Кімстач, К.І. Узлов

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БРОНЗИ СИСТЕМИ Cu-Al-Si-Sn-Mn ПРИ ЇЇ ЗАТВЕРДІННІ В КОКІЛІ

Анотація. Приведено результати експериментальних досліджень щодо впливу хімічного складу на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn при її затвердінні в кокілі. Встановлено, що для виготовлення литих виробів з досліджуваної бронзи, яку заливають в кокіль, треба використовувати сплав в якому, мас. %: Al=6,0…7,5; Si=1,0…2,5; Mn= 0,21…0,45; Sn= 1,0…2,2; неминучі домішки (пп) не більше 0,45; Cu – залишок при співвідношенні компонентів, яке визначають безрозмірним критерієм K_R, що обчислюють за формулою: $K_R = (1- 0,01 \cdot пп) \cdot (Al-Si-Mn)/(1+Sn)^2$ і який дорівнює 0,32…0,85. Алюмінієва бронза з величиною $K_R = 0,32…0,56$ в литому стані (без термічної обробки) є багатофазним сплавом з наступними рівнями механічних властивостей: σ_B =423…550 МПа; $\sigma_{0,2}$ =279…397 МПа; δ_5 =3,2…5,5%; KCU =13…21 Дж/см^2, що дає підставу віднести її до числа високоміцних алюмінієвих бронз з достатнім, як для ливарних сплавів, рівнем пластичності. Використання результатів роботи дозволить прогнозувати рівень механічних властивостей ливарної алюмінієвої бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn з K_R =0,32…0,56 та адаптувати рівні її властивостей за рахунок відповідної корекції хімічного складу для виготовлення литих деталей з урахуванням особливостей та умов їх роботи в верстато-, приладо-, машино-, суднобудуванні та інших галузях промисловості.
Ключові слова. Бронза, властивості, міцність, пластичність, мідь, алюміній, кремній, олово, марганець, кокіль.

Постановка проблеми. Одна з особливостей литих деталей, як цільної конструкції, полягає в тому, що сплав в їх елементах має різний рівень механічних, експлуатаційних та споживчих властивостей. Це, зокрема, пов’язано з тим, що більшість виливків є конструкціями з сукупністю різних за формою і розмірами їх геометричних фрагментів. Це істотно впливає на інтенсивність їх теплообміну з ливарною формою і, відповідно, на структуру і рівень властивостей матеріалу виливка.

Крім зазначеного, спосіб лиття та вид ливарних форм також істотно впливають на структуру та властивості сплаву виливка [1-3]. Тому, ці обставини потрібно обов’язково враховувати під час вибору раціонального способу виготовлення литва з дотриманням певного хімічного складу сплаву виливків та балансу вимог щодо технічної ефективності виробництва, його економічності, екологічної безпеки, енергоємності та рівня якості виробів.

© Кімстач Т.В., Узлов К.І., 2025

При цьому, для забезпечення конкурентоспроможності литих деталей необхідно виготовляти виливки як з високим рівнем ливарної якості, так і фізико-механічних, споживчих та функціональних властивостей. В свою чергу, всі ці характеристики литих деталей суттєво залежать від хімічного складу сплаву виливка та від інтенсивності тепловіддачі від виливка до ливарної форми [2-5]. Тому, дослідження впливу хімічного складу сплавів та температурних умов формування виливків на структуру та властивості їх сплавів є важливим науково-прикладним напрямком досліджень та актуальною задачею в підвищенні конкурентної здатності литих деталей, в тому числі, з виробами, які виготовляють шляхом механічної обробки із попередньо деформованих заготовок сплавів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні, з числа стандартизованих марок бронз найбільш затребуваними є подвійні та багатокомпонентні алюмінієві бронзи. Така затребуваність алюмінієвих бронз зумовлена цілеспрямованою керованістю їх властивостей за рахунок зміни хімічного складу та умов затвердіння та охолодження у ливарній формі, чистоти за неметалевими включеннями та газонасиченості, якості шихтових матеріалів та умов проведення плавки і т. ін. В сукупності це дозволяє отримувати литі деталі з таких бронз, які мають широкий комплекс преференційних властивостей у будь якому їх поєднанні. Такі можливості алюмінієвих бронз, по суті, зробили їх універсальними сплавами, про що свідчить їх велика затребуваність практично всіма існуючими галузями промисловості.

Залежно від вмісту в алюмінієвій бронзі Al та інших легуючих елементів, її зміцнення може проходити за розчинним механізмом, за механізмом виникнення евтектоїду ($\alpha+\gamma_2$) або механізмом дисперсійного зміцнення.

З аналізу фазової діаграми стану системи Cu-Al [6, 7] випливає, що зміцнення подвійних сплавів системи Cu-Al із вмістом Al менше 9,4% за дисперсійним механізмом неможливе. Тому зміцнення таких однофазних бронз (наприклад, бронз марок БрА5, БрА7, БрА9 тощо) реалізують за рахунок легування твердого розчину додатковими хімічними елементами, наприклад, Fe, Ni або деформацією з числа сучасних способів обробки металів тиском.

В структурі бронз з більшим за 9,4% вмістом алюмінію або внаслідок легування Si та Mn з'являється β-фаза. Ця фаза народжується за евтектичною реакцією і є твердим розчином на основі хімічної сполуки Cu_3Al з широкою областю гомогенності. Під час охолодження таких бронз у твердому стані при 565 °С β-фаза зазнає евтектоїдного розпаду за реакцією [6]:

$$\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2,$$

де γ_2 - твердий розчин на основі хімічної сполуки Cu_9Al_4, що призводить до підвищення їх міцності.

Наведений вище опис можливих механізмів зміцнення сплавів системи Cu-Al відповідає рівноважним умовам їх затвердіння та охолодження бронз або близьких до таких, наприклад, які реалізуються в піщаній ливарній формі. В умовах підвищеної швидкості затвердіння та охолодження структура бронз може суттєво змінюватись, супро-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

воджуючись незмінністю (наприклад, у бронз марок БрА10Мц2Л, БрА10Ж4Н4, БрА11Ж6Н6, БрА9Ж4Н4Мц1) або підвищенням рівня, зокрема, міцності та зниженням рівня відносного видовження (наприклад, у бронз марок БрА9Ж3Л, БрА10Ж3Мц2).

Зміцнення шляхом дисперсійного твердіння досягають в результаті повільного охолодження бронзового виливка в ливарній формі або проведення його термічної обробки – «старіння» з розпадом пересиченого твердого мідного розчину. Як за правило, до дисперсійного зміцнення схильні олов'яні, нікель-олов’яні бронзи тощо, у яких при старінні, як, наприклад, у нікель-олов'яної бронзи, в структурі з’являються дрібнодисперсні частинки мідно-олов'яної інтерметалідної сполуки.

Як свідчить практика виробництва бронзових виливків, зі збільшенням швидкості затвердіння та охолодження структура та властивості бронзи стають менш залежними як від змін у її хімічному складі в межах марки, так і від конфігураційних та конструкційних особливостей виливків. Тобто, по суті, використання сталевих або чавунних кокілів для бронзових виливків замість піщаних ливарних форм дозволяє досягти рівноміцності різних ділянок деталей складної конфігурації за рахунок збільшення однорідності структури матеріалу в них.

Виходячи з аналізу поелементного впливу легуючих елементів алюмінієвих бронз [8, 9] можливо прогнозувати, що бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, при певному вмісті легуючих елементів, є багатофазними ливарними сплавами в яких поєднано відносно високу міцність і, притаманний для ливарних сплавів, рівень пластичності при нормальній температурі, немагнітність, висока корозійна стійкість в природному середовищі тощо. Тобто, з точки зору комплексу преференційних залежностей, бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn є досить перспективним матеріалом, який досить не має аналогів з числа стандартизованих бронз, як в Україні, так і інших країнах світу. Так, наприклад, авторами наявної роботи із сукупності цієї багатокомпонентної системи вже розроблений потрійний Cu-Sn-Si акустичний сплав [10].

Тим не менш, на сьогодні не встановлений оптимальний хімічний склад такої багатокомпонентної бронзи, відсутні дані про комплексний вплив її хімічного складу на рівень механічних властивостей, відсутній опис структури та вплив швидкості охолодження на сплав в ливарній формі при затвердінні.

Мета дослідження. Метою роботи є встановлення закономірностей впливу хімічного складу на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn при її затвердінні в кокілі.

Методика досліджень. Дослідження механічних властивостей бронз системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, які у своєму складі мали, % (мас.): алюмінію – 5,0...7,9, кремнію – 0,85...2,95, марганцю – 0,005…1,21, олова – до 3,3 та небажаних домішок (nn) – до 0,75, мідь – залишок, а також бронз БрА9Мц2Л, БрА9Ж3Л, БрА10Ж3Мц2 та БрА10Ж4Н4 промислового розповсюдження проводили при 20±1 °С на випробувальній машині моделі FP-100/1, величину ударної в’язкості розраховували за результатами випробувань зразків бронз на маятниковому копрі моделі PSW-30.

Температуру розплавів з точністю 1 °С вимірювали хромель-алюмелевою термопарою в комплекті з електронним потенціометром, температуру повітря з точністю 1 °С вимірювали спиртовим термометром марки ТТЖ-М.

Для плавки бронз використовували: мідь катодна марки М2, алюміній марки Al99,7, кремній марки Кр1, олово марки О1, марганець металевий Мн95, нікель марки Н1, сталь марки Ст3. Плавку бронз проводили в графітовому тиглі індукційній печі під шаром деревного попередньо просушеного при 150 °С вугілля.

Розкислення розплаву проводили марганцем при досягненні розплавом температури 1200±10 °С. Після розкислення впродовж 1 хв дзеркало розплаву очищали від залишків деревного вугілля і з тигля заливали його у піщану форму, яка мала температуру 22±2 °С, та сталевий кокіль з початковою температурою 110±5 °С. Піщану форму виготовляли з піщано-рідкоскляної суміші, яка містила 6% рідкого скла (силікату натрію).

Використані для заливання піщані форми попередньо сушили мікрохвильовим випромінювання впродовж 10 хв та охолоджували на повітрі до 22±2 °С. Сталевий кокіль (матеріал кокілю – Ст3) не мав шару вогнетривкого покриття на своїх робочих поверхнях і в зібраному стані до заливання впродовж не менше 90 хв знаходився в муфельній печі при температурі 110±5 °С. Для заливання робочі порожнини ливарних форм розташовували вертикально відносно їх осі. Заливання робочих порожнин ливарних форм проводили через верхній надлив-лійку.

Бронзові виливки (16×16×120 мм) в піщаних формах до вибивки охолоджували впродовж 24 годин, в кокілях - впродовж 6±1 хв з наступним видаленням виливків з кокілей і їх охолодженням на повітрі з нормальною температурою. Хімічний склад виплавлених бронз визначали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L. Металографічні дослідження проводили на мікроскопі Neophot 21.

Для опису комплексного впливу легувальних елементів бронзи на її механічні властивості прийняли безрозмірний критерій K_R, який визначається зі співвідношення:

$$K_R = \left(1 - \frac{nn}{100}\right) \cdot \frac{Al - Si - Mn}{(1+Sn)^2}, \quad (1)$$

де: nn, Al, Si, Sn, Mn – масовий вміст небажаних домішок, алюмінію, кремнію, олова та марганцю у бронзі відповідно, %; 100 – балансова константа, %.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для бронз системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, які залиті в кокіль, з метою встановлення зв'язку між величиною критерію K_R та рівнями їх механічних властивостей використали результати експериментальних досліджень та розрахункові дані за формулою (1), які представлені таблиці 1.

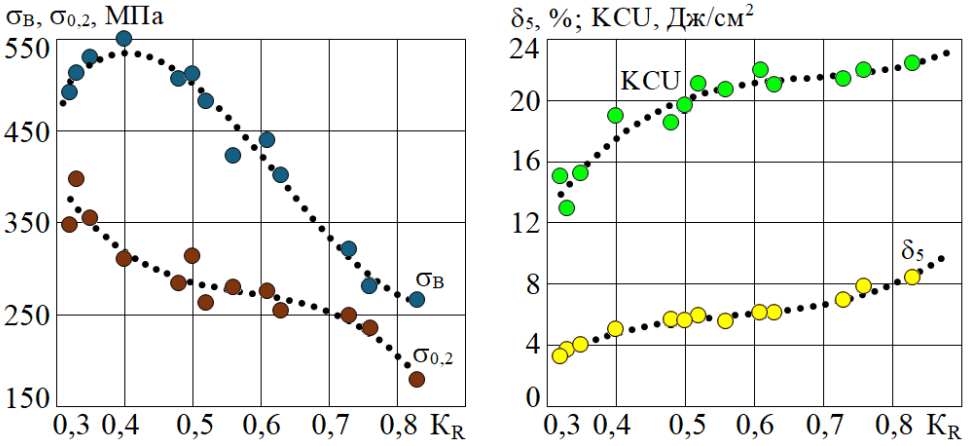
Залежність механічних властивостей досліджуваних бронз, що залиті в кокіль, від величини критерію K_R за даними таблиці 1 представлені на рис. 1.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Таблиця 1

Хімічний склад, механічні властивості та величина критерію K_R, бронз системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, які залиті в кокіль

Масовий вміст хімічних елементів, %						Механічні властивості				K_R
Cu	Al	Si	Mn	Sn	nn	σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	KCU, Дж/см^2	
88,5	6,25	1,93	0,461	2,47	0,389	492	347	3,2	15,0	0,32
88,4	6,4	2,48	0,246	2,13	0,744	513	397	3,7	12,9	0,33
89,1	6,08	2,20	0,207	2,24	0,213	530	355	4,0	15,2	0,35
89,0	6,24	2,10	0,49	2,00	0,146	550	310	5,0	19,0	0,40
89,1	6,63	1,83	0,138	2,11	0,192	507	284	5,6	18,5	0,48
88	7,86	1,81	0,399	1,53	0,401	512	313	5,6	19,6	0,50
88,7	6,97	2,02	0,104	2,04	0,166	482	262	5,9	21,1	0,52
88,2	7,05	2,46	0,234	1,78	0,276	423	279	5,5	20,7	0,56
88,1	7,47	2,09	0,132	1,92	0,288	440	275	6,1	22,0	0,61
89,5	6,81	1,59	0,063	1,85	0,187	401	254	6,1	21,0	0,63
88,9	6,88	2,50	0,148	1,41	0,162	321	248	6,9	21,4	0,73
88,7	7,3	1,92	0,133	1,63	0,317	281	235	7,8	22,0	0,76
90,4	6,46	1,40	0,097	1,45	0,193	265	178	8,4	22,4	0,83



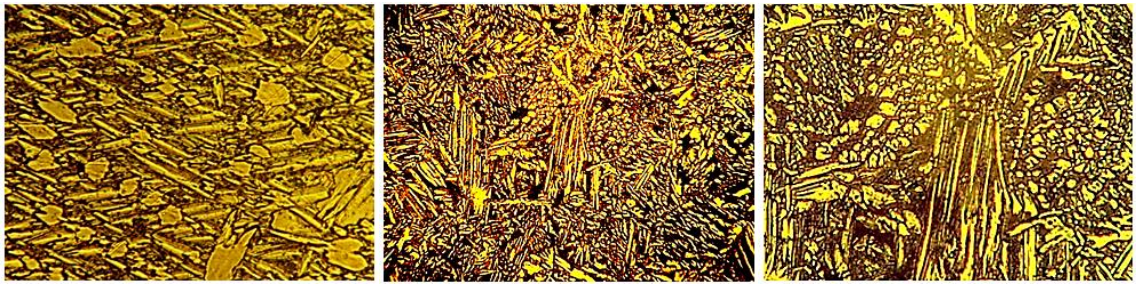
а б

Рисунок 1 - Залежність показників σ_B та $\sigma_{0,2}$ (а), δ_5 та KCU (б) бронз системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, що залиті в кокіль, від величини критерію K_R

Для бронз, з величиною K_R від 0,32 до 0,84 (див. рис. 1), що були залиті у кокіль, характер ходу залежностей механічних властивостей від K_R подібний, як і у багатьох відомих сплавів між показниками міцності та пластичності [11, 12]. Тобто, з підвищенням міцності та плинності бронз їх пластичні властивості зменшуються і стають тим менше, чим менше величина критерію K_R. При цьому, з точки зору найбільшої міцності та

плинності при розтягуванні, оптимальним інтервалом змін критерію K_R для таких бронз можна вважати інтервал зміни K_R від 0,32 до 0,56.

Слід зазначити, що для досліджуваної бронзи швидкість затвердіння та охолодження в ливарній формі відіграє суттєву роль. З підвищенням інтенсивності цих процесів в бронзі суттєво змінюється її структура. Про це, наприклад, свідчать результати порівняльного аналізу мікроструктур бронзи, представлених на рис. 2.



а(×200) б(×200) в(×500)

Рисунок 2 - Мікроструктура алюмінієвої бронзи з K_R=0,46, що була залита в пісочну форму (а) і кокіль (б, в)

При цьому, така зміна структури супроводжується і зміною об'ємного вмісту багатофазної структурної складової бронзи. Зокрема, в структурі бронзи з K_R=0,46, що була залита в піщану форму, об'ємний вміст багатофазної структурної складової досягає φ=53%, а в кокіль φ=59%.

Як відомо [12-15], для визначення пластичності та придатності будь якого сплаву за загальноприйнятою оцінкою є співвідношення плинності сплаву до його міцності при розтягуванні, які визначені при нормальній температурі. Тобто, сплав вважають крихким при $\sigma_{0,2}/\sigma_в>0,95$ і недоцільно пластичним як для ливарних сплавів при $\sigma_{0,2}/\sigma_в<0,5…0,6$.

Відносно досліджуваної бронзи можливо констатувати, що в усьому досліджуваному інтервалі змін величини K_R (від 0,32 до 0,84) досліджувані алюмінієві бронзи, що залиті в кокіль, являють собою достатньо пластичні сплави про що, свідчить залежність $\sigma_{0,2}/\sigma_в=f(K_R)$ на рис. 3.

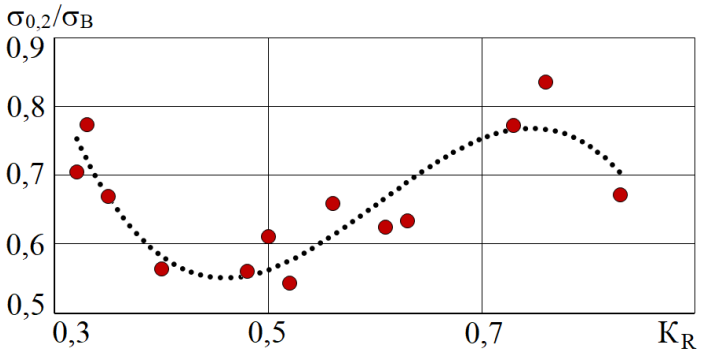


Рисунок 3 – Залежність $\sigma_{0,2}/\sigma_в=f(K_R)$ бронз системи Cu-Al- Si-Sn-Mn, що залиті в кокіль

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Для досліджуваної бронзи, що була залита в кокілі, між окремими показниками її механічних властивостей, існують певні залежності. Про це свідчать зображення на рис. 4, які були побудовані за даними таблиці 1.

Рівняння ліній тренду на рис. 4 та величини достовірності їх апроксимації (R^2), які розрахували за програмою Excel мають наступний вигляд та, відповідно, величини:

$\sigma_в=8{,}8457\cdot(\delta_5)^3-167{,}33\cdot(\delta_5)^2+947{,}61\cdot\delta_5-1133{,}3$ (МПа); $R^2=0{,}91$,

$\sigma_{0,2}=1{,}1097\cdot(\delta_5)^3-19{,}167\cdot(\delta_5)^2+68{,}817\cdot\delta_5+311{,}7$ (МПа); $R^2=0{,}89$,

$KCU=-0{,}3052\cdot(\delta_5)^2+5{,}2783\cdot\delta_5-0{,}18445$ (МПа); $R^2=0{,}97$.

З метою порівняння рівнів механічних властивостей за прийнятою технологією були виготовлено литі зразки з конструкційних алюмінієвих бронз стандартизованого хімічного складу. Результати визначення механічних властивостей конструкційних алюмінієвих бронз стандартизованого хімічного складу що залиті в сталеві кокілі приведено в таблиці 2.

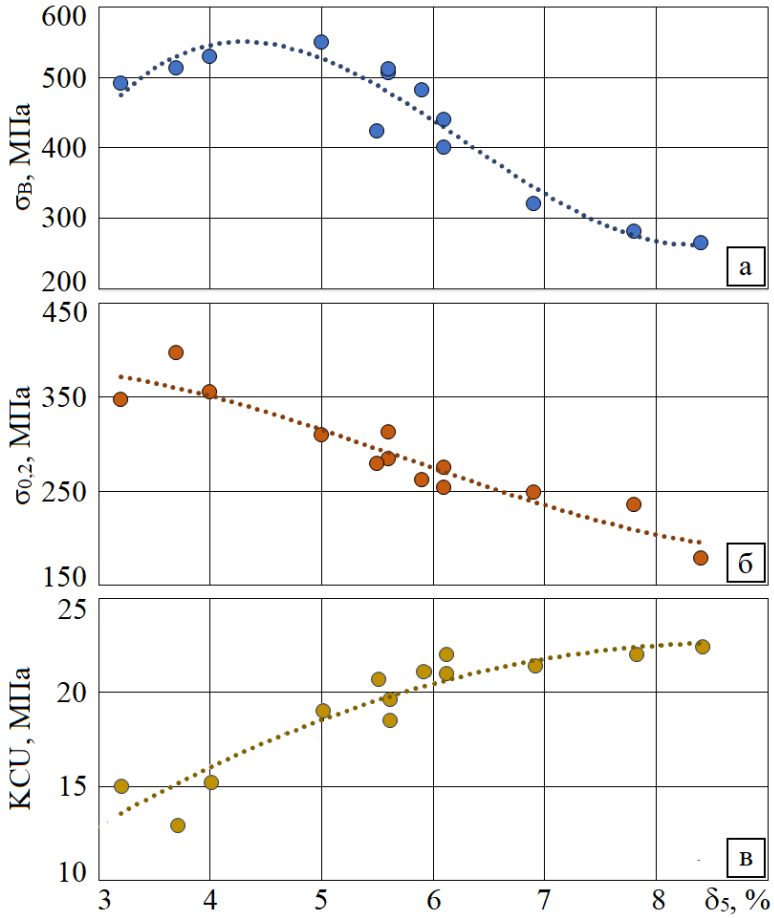


Рисунок 4 – Залежності $\sigma_в=f(\delta_5)$ (а), $\sigma_{0,2}=f(\delta_5)$ (б) та $KCU=f(\delta_5)$ (в) для бронз з $K_R=0{,}32…0{,}84$, що залиті в кокіль

Таблиця 2

Механічні властивості стандартизованих конструкційних алюмінієвих бронз, які були залиті в сталеві кокілі

Марка бронзи	Механічні властивості			
	σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %	KCU, Дж/см^2
БрА9Мц2Л	429-457	219-233	20-23	71-74
БрА9Ж3Л	468-492	278-292	9-11	62-64
БрА10Ж3Мц2	564-573	241-268	11-13	69-73
БрА10Ж4Н4	639-661	288-307	5-6	20-23

З аналізу отриманих даних витікає, що з числа досліджених бронз системи Cu-Al-Si-Sn-Mn найбільш раціональним для виготовлення виливків і, відповідно, литих деталей є алюмінієві бронзи, які заливають в кокіль і мають величину K_R=0,32…0,56.

Такий вибір пояснюється тим, що бронза з величиною K_R = 0,32…0,56 в литому стані при литті в кокіль має наступні механічні властивості: σ_B =423…550 МПа; $\sigma_{0,2}$ =279…397 МПа; δ_5 =3,2…5,5%; KCU =13…21 Дж/см^2. В свою чергу, порівняльний аналіз рівнів показників механічних властивостей досліджуваної бронзи та стандартизованих конструкційних алюмінієвих бронз (див. таблицю 2) свідчить, що досліджувана бронза з величиною K_R = 0,32…0,56 в литому стані (при литті в кокіль) є високоміцною з достатнім, як для стандартизованих ливарних бронз, рівнем пластичності.

Висновки.

1. Досягнення поставленої в роботі мети було забезпечено тим, що для виготовлення литих виробів з досліджуваної бронзи, яку заливають в кокіль, виплавляють сплав в якому, мас., %: Al = 6,0…7,5; Si = 1,0…2,5; Mn = 0,21…0,45; Sn = 1,0…2,2; неминучі домішки (nn) не більше 0,45; Cu – залишок при співвідношенні компонентів, яке визначається коефіцієнтом K_R та обчислюється за формулою: $K_R = (1- 0{,}01 \cdot nn) \cdot (Al\text{-}Si\text{-}Mn)/(1+Sn)^2$ і дорівнює 0,32…0,85.

2. На відміну від литої структури бронзи, що була залита в піщану форму, структура бронзи, яка була залита в кокіль характеризується підвищеним вмістом багатофазної структурної складової

3. Використання встановлених закономірностей і результатів дослідження дозволить прогнозувати рівень механічних властивостей ливарних бронз системи Cu-Al-Si-Sn-Mn з K_R =0,32…0,85 для виготовлення литих деталей в кокілі під конкретні умови їх експлуатації які використовують в верстато-, приладо-, машино-, суднобудуванні та інших галузях промисловості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Gavariev R. V., Gavarieva K. N. On the Issue of Casting Copper Alloys in Chill Mold. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1052. P. 313–318. URL: https://doi.org/10.4028/p-0kxodb.

2. Effect of casting mould on mechanical properties of 6063 Aluminum alloy / W. Ayoola et al. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2012. Vol. 7, no. 1. P. 86–96. URL:

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

https://www.researchgate.net/publication/287590221_Effect_of_casting_mould_on_mechanical_properties_of_6063_Aluminum_alloy.
3. Suthar J., Persis J., Gupta R. Critical parameters influencing the quality of metal castings: a systematic literature review. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2021. URL: https://doi.org/10.1108/ijqrm-11-2020-0368.
4. Hamasaiid A., Dargusch M. S., Dour G. The impact of the casting thickness on the interfacial heat transfer and solidification of the casting during permanent mold casting of an A356 alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 47. P. 229–237. URL: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.09.039.
5. COPPER CASTING ALLOYS. New York : Copper Development Association, 1994. URL: https://www.copper.org/publications/pub_list/pdf/7014.pdf.
6. Грешта В.Л., Лисиця О.В., Степанова Л.П. Кольорові метали та сплави на їх основі : навчальний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. 286 с.
7. Узлов К.І., Кімстач Т.В., Реп'ях С.І. Ливарна корозійностійка триботехнічна олов'яно-алюмінієва бронза: Монографія. Дніпро, Журфонд, 2024. 148 с.
8. Effect of alloying elements on aluminum bronze - Knowledge. *China Titanium Bar Manufacturers, Titanium Tube Suppliers, Titanium Sheet Factory - GNEE*. URL: https://www.chinatialloy.com/info/effect-of-alloying-elements-on-aluminum-bronze-95775396.html.
9. Callcut V. Aluminum Bronzes - Part I. New York : Copper Development Association, 2002 37 p. URL: https://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2002/08/aluminum1.html.
10. Спосіб виготовлення бронзи музичної : пат. 147278 Україна. № u202006418 ; заявл. 05.10.2020 ; опубл. 28.04.2021, Бюл. № 17/2021. 6 с. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1590857/.
11. Lebedyev A.A., Kovalchuk B.I., Giginjak F.F., Lamashevsky V.P., Handbook of mechanical properties of structural materials at a complex stress state. New Yorc: Begell House, Ins., Publishers., 2000. 500 p.
12. The effect of the yield to tensile strength ratio on stress/strain concentrations around holes in high-strength steels / S. F. P. M. Obers et al. *Marine Structures*. 2022. Vol. 84. P. 103205. URL: https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103205
13. Zhang S.-h., Zhao D.-w., Wang X.-n. Influence of yield-to-tensile strength ratio (Y/T) on failure assessment of defect-free and corroded X70 steel pipeline. *Journal of Central South University*. 2014. Vol. 21, no. 2. P. 460–465. URL: https://doi.org/10.1007/s11771-014-1960-1).
14. Register L. Rules for the manufacture, testing and certification of materials //American Bureau of Shipping. Generic Rules for Classification, Materials and Welding and Survey After Construction. Part. 2020. T. 2.
15. Wong W. J., Walters C. L. Failure Modes and Rules Related to the Yield-to-Tensile Strength Ratio in Steel Structures. *ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Virtual, Online, 21–30 June 2021. 2021. URL: https://doi.org/10.1115/omae2021-61995.

REFERENCES

1. Gavariev, R. V., & Gavarieva, K. N. (2022). On the Issue of Casting Copper Alloys in Chill Mold. *Materials Science Forum, 1052*, 313–318. https://doi.org/10.4028/p-0kxodb.

2. Ayoola, W., Adeosun, S., Sanni, O., & Oyetunji, A. (2012). 2. Effect of casting mould on mechanical properties of 6063 Aluminum alloy. *Journal of Engineering Science and Technology, 7*(1), 86 –
96. https://www.researchgate.net/publication/287590221_Effect_of_casting_mould_on_mechanical_properties_of_6063_Aluminum_alloy.

3. Suthar, J., Persis, J., & Gupta, R. (2021). Critical parameters influencing the quality of metal castings: a systematic literature review. *International Journal of Quality & Reliability Management*. https://doi.org/10.1108/ijqrm-11-2020-0368.

4. Hamasaiid, A., Dargusch, M. S., & Dour, G. (2019). The impact of the casting thickness on the interfacial heat transfer and solidification of the casting during permanent mold casting of an A356 alloy. *Journal of Manufacturing Processes, 47*, 229–237. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.09.039.

5. *COPPER CASTING ALLOYS*. (1994). New York : Copper Development Association. https://www.copper.org/publications/pub_list/pdf/7014.pdf

6. Hreshta V.L., Lysytsia O.V., Stepanova L.P (2014). *Kolorovi metaly ta splavy na yikh osnovi* [*Colored metals and alloys based on them*]. ZNTU. 286 p.

7. Uzlov, K. I., Kimstach, T. V., & Repiakh, S I. (2024). *Lyvarna koroziinostiika trybotekhnichna oloviano-aliuminiieva bronza* [*Foundry corrosion-resistant tribotechnical tin-aluminum bronze*]. Zhurfond. 148 p.

8. *Effect of alloying elements on aluminum bronze - Knowledge*. China Titanium Bar Manufacturers, Titanium Tube Suppliers, Titanium Sheet Factory - GNEE. https://www.chinatialloy.com/info/effect-of-alloying-elements-on-aluminum-bronze-95775396.html.

9. Callcut V. Aluminum Bronzes - Part I. (2002). New York : Copper Development Association,. 37 p. URL: https://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2002/08/aluminum1.html.

10. Uzlov, K. I., Repiakh, S. I., Dziubina, A. V., Mazorchuk, V. F., & Kimstach, T. V. (2021). Sposib vyhotovlennia bronzy muzychnoi [Method of making musical bronze] (Patent Ukrainy № 147278). DP “Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti". https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1590857/.

11. Lebedyev, A., Kovalchuk, B., Giginjak, F., & Lamashevsky, V. (2000). *Handbook of mechanical properties of structural materials at a complex stress state*. Begell House, Ins., Publishers. 500 p.

12. Obers, S. F. P. M., Overal, J. J., Wong, W. J., & Walters, C. L. (2022). The effect of the yield to tensile strength ratio on stress/strain concentrations around holes in high-strength steels. *Marine Structures, 84*, 103205. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103205.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

13. Zhang, S.-h., Zhao, D.-w., & Wang, X.-n. (2014). Influence of yield-to-tensile strength ratio (Y/T) on failure assessment of defect-free and corroded X70 steel pipeline. *Journal of Central South University*, *21*(2), 460–465. https://doi.org/10.1007/s11771-014-1960-1.

14. Register, L. (2020). Rules for the manufacture, testing and certification of materials. *American Bureau of Shipping. Generic Rules for Classification, Materials and Welding and Survey After Construction. Part, 2*.

15. Wong, W. J., & Walters, C. L. (2021). Failure Modes and Rules Related to the Yield-to-Tensile Strength Ratio in Steel Structures. У *ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers. https://doi.org/10.1115/omae2021-61995.

Received 17.03.2025.
Accepted 19.03.2025.

Chemical composition influence on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronze during its solidification in die mold

Chemical composition influence on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronze during its solidification in die experimental studies results are presented. It has been established that for cast products from the studied bronze, which has been poured into die mold, manufacturing it is necessary to use an alloy in which, wt. %: Al=6.0…7.5; Si=1.0…2.5; Mn=0.21…0.45; Sn=1.0…2.2; inevitable impurities (nn) not more than 0.45; Cu is remainder at the components ratio, which is determined by dimensionless criterion K_R*, calculated by formula:* $K_R = (1- 0{,}01 \cdot nn) \cdot (Al\text{-}Si\text{-}Mn)/(1+Sn)^2$ *and which is equal 0.32…0.85. Aluminum bronze with* $K_R = 0.32…0.56$ *value in cast state (without heat treatment) is multiphase alloy with following mechanical properties levels:* σ_B*=423…550 MPa;* $\sigma_{0,2}$ *=279…397MPa;* δ_5 *=3,2…5,5%; KCU =13…21 J/cm*^{2}*, which gives reason to classify it as high-strength aluminum bronze with sufficient, as for foundry alloys, plasticity level. This work results using will allow predicting the mechanical properties level of Cu-Al-Si-Sn-Mn system cast aluminum bronze with* K_R *=0.32…0.56 and adapting its properties levels by chemical composition appropriate correction for cast parts manufacturing, taking into account characteristics and their operation conditions in machine tool, instrument, mechanical, shipbuilding and other industries.*

Keywords. Bronze, properties, strength, plasticity, copper, aluminum, silicon, tin, manganese, die mold.

Кімстач Тетяна Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Матеріалознавства та термічної обробки металів», Український державний університет науки і технологій.

Узлов Костянтин Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Матеріалознавства та термічної обробки металів», Український державний університет науки і технологій

Kimstach Tetiana Volodymyrivna –candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of the Department of Material Science and Heat Treatment of Metals at Ukrainian State University of Sci-ence and Technologies.

Uzlov Kostiantyn Ivanovych – doctor of engineering sciences, professor, professor of the Department of Material Science and Heat Treatment of Metals at Ukrainian State University of Science and Technologies.