

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.10

УДК 691.735:620.173.2

Т.В. Кімстач, К.І. Узлов

СИНЕРГЕТИЧНИЙ ТА СЕЛЕКТИВНИЙ ВПЛИВ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БРОНЗИ СИСТЕМИ CU-AL-SI-SN-MN

Анотація. Представлено результати досліджень синергетичного та селективного впливу легуючих елементів на механічні властивості ливарної бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, розплав якої був залитий та охолоджений в піщану та сталеву ливарні форми.

Мета роботи - встановити закономірності синергетичного та селективного впливу легуючих компонентів та умов формування литої термічно не обробленої бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn при масовому вмісті алюмінію – 6,0...7,5%, кремнію – 1,0...2,5%, марганцю – 0,21...0,45%, олова – 1,0...2,2% на її механічні властивості при нормальній температурі, розплав якої був залитий в піщану та сталеву ливарну форму.

Для визначення комплексного впливу хімічного складу досліджуваної бронзи на її механічні властивості використали критерій, K_R , який є певним співвідношенням легуючих елементів бронзи та її домішок. Хімічний склад виплавлених бронз визначали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L. Інтервал температур за яким розраховували середньозважену швидкість охолодження бронзових зразків визначали за результатами диференційного термогравіметричного аналізу, який проводили на синхронному термічному аналізаторі STA 449 C «Jupiter» фірми NETZSCH (Німеччина). Механічні властивості бронз визначали за результатами руйнування зразків на машині FP-100/1 та маятниковому копрі PSW-30. Твердість за Брінелем визначали на приладі ТШ-2.

Встановлено, що синергетичний та селективний вплив легуючих елементів на границі міцності та плинності бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn визначається більшою мірою швидкістю охолодження бронзи в ливарній формі, підвищення якої призводить до інверсії характеру селективного впливу легуючих компонентів на міцність. Характер селективного впливу хімічних елементів на границю плинності та твердість лише частково змінюється по відношенню до олова і

зовсім не впливає на характер змін показників пластичності бронзи. При цьому, з підвищенням швидкості охолодження бронзи в ливарній формі ступінь синергетичного та селективного впливу легуючих елементів на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn зменшується. З числа легуючих елементів в бронзах системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, за характером впливу на рівень механічних властивостей, твердості та долі хімічної сполуки в структурі досліджуваної бронзи, алюміній є антиподом до олова, кремнію та марганцю.

Ключові слова: бронза, міцність, пластичність, твердість, властивості, алюміній, кокіль, піщана форма, магнітна проникність

Вступ

Промислові алюмінієві бронзи – сучасні сплави великотоннажного виробництва на основі міді з обов'язковим вмістом алюмінію в кількості 5...14% (за масою). За вмістом алюмінію алюмінієві бронзи поділяють на однофазні (подвійні та потрійні за кількістю компонентів), які містять 5...9% Al та багатофазні (багатокомпонентні) бронзи з вмістом алюмінію 6,5...14%, заліза та/або нікелю (до 6% кожного), марганцю (до 3,5%), кремнію (до 2,5%) та ін.

Алюмінієві бронзи характеризуються високим рівнем механічних властивостей, твердості, стійкості до корозії в природних умовах та багатьох середовищах техногенного походження, низьким рівнем магнітної проникності, іскровою безпекою, бактерицидністю, біостатичністю та ін. Вони придатні як для виготовлення виробів способами лиття та механічної обробки, так і способами деформаційної обробки у холодному та гарячому стані. Все це дозволило використовувати алюмінієві бронзи для виробництва виробів суднобудування, систем опріснення морської води, нафтогазової, хімічної, нафтохімічної, гірничодобувної, оборонної, харчової, аерокосмічної промисловості, тощо. [1, 2]. При цьому маса сучасних виливків з алюмінієвих бронз становить від декількох грамів у ювелірних та художніх виробів до 70 т у суднобудуванні [3].

Тим не менш, для розширення технічних можливостей, підвищення надійності та довговічності сучасної техніки потрібно не лише вдосконалення існуючих, а й створення нових сплавів, зокрема бронз з різними наборами комплексів преференційних властивостей. При створенні таких бронз

особливого значення набувають знання як про синергетичний, так і селективний вплив легуючих компонентів литих бронз, формування структури і властивостей яких може відбуватися за різних умов.

Стан питання

Сучасні підходи до розробки хімічного складу будь-яких бронз базуються на ретельному врахуванні впливу кожного їх хімічного елемента на їх властивості. Це дозволяє обґрунтувати оптимальний або раціональний склад будь-якої бронзи, зокрема, ливарної багатокомпонентної високоміцної корозійностійкої немагнітної. При цьому, вибір кількісних параметрів для легування бронзи залежить від поєднання обраних хімічних елементів, їх взаємодії та впливу на структуру сплаву. Про це, зокрема, свідчать дані таблиці 1.

Виходячи з цього, для встановлення раціонального складу бронзи з заданими пріоритетними властивостями проводять оцінювання індивідуального впливу хімічних елементів на властивості алюмінієвої бронзи, зокрема, використовуючи наступні загально прийняті уявлення [3-6]:

алюміній – основний легувальний немагнітний компонент алюмінієвих бронз, який суттєво підвищує їх механічні та споживчі властивості. При масовому вмісті вище 5% алюміній забезпечує бронзі високу корозійну стійкість в різних середовищах, зокрема, в морській воді. Перевищення вмісту алюмінію за 7,4% призводить до появи в структурі бронз системи Cu-Al β -фази (Cu_3Al) яка підвищує рівень механічних властивостей бронзи, але при вмісті більше 9% алюміній погіршує корозійну стійкість бронзи в вологому повітрі [5, 6]. Виходячи з цього, стандартами багатьох країн світу в таких бронзах затверджено масовий вміст алюмінію 5% та 7% (марки БрА5, БрА7), які мають невисоку корозійну стійкість в перегрітій водяній парі, але, будучи однофазними, дуже пластичні завдяки чому їх переважно використовують для виготовлення виробів методами ОМТ або шляхом механічної обробки деформованих заготовок.

Таблиця 1

Типовий склад та область використання виробів з алюмінієвих бронз
за стандартами Сполучених Штатів Америки

Бронза (стандарт)	Вміст основних хімічних елементів, % (мас.)					Область виробів використання
	Cu	Al	Fe	Ni	Mn	
C95200 (ASTM B505, B271)	91	8,5-9,5	≤0,1	≤0,2	≤0,1	Вироби загального призначення у тому числі ті, що працюють в умовах тертя та підвищених навантажень
C95400 (ASTM B148, B763)	85	10-11,5	3-4	≤0,5	≤0,5	Вироби загального призначення у тому числі деталі для аерокосмічної промисловості та важкого машинобудування
C95500 (ASTM B148)	80	10-11	3-5	4-5	≤0,5	Морські судна та обладнання, що працює в морській воді та соляному тумані, гребні гвинти
C95800 (ASTM B150)	79-81	9-11	4-5	4-5	≤0,5	Вироби з низьким коефіцієнтом тертя, у тому числі підшипники ковзання та втулки

➤ кремній - немагнітний матеріал, який при вмісті до 2% підвищує ливарні властивості, твердість, стійкість до високотемпературного окиснення бронз, покращує оброблюваність лезовим інструментом, але водночас знижує їх герметичність. Додавання Si у невеликій кількості до алюмінієвої бронзи дозволяє отримати однофазну структуру з підвищенням міцністю, твердістю та корозійною стійкістю, а обробка тиском суттєво підвищує рівні її механічних властивостей. Такою бронзою, наприклад, є бронза БрА7К2 (бронза C95600 за стандартом ASTM [7]). Надлишковий вміст кремнію в такій бронзі призводить до виникнення в її структурі β-фази системи Cu-Si, що надає бронзі крихкості. Виходячи з викладеного, вміст кремнію та алюмінію в багатокомпонентних

немагнітних корозійностійких ливарних бронзах доцільно обмежувати, відповідно – 1,0...2,5% і 5,0...7,5%.

➤ марганець - багатофункціональний у бронзі елемент, який підвищує жароміцність, міцність, пластичність, антифрикційні властивості і корозійну стійкість алюмінієвих бронз за нормальної температури, водночас виконуючи функцію розкислювача бронзи. Але Mn при цьому знижує її рідкоплинність та лінійну усадку виливків. До 2% марганець підвищує міцність, ударну в'язкість, корозійну стійкість бронзи. Вміст марганцю понад ~2% за певних умов може сприяти утворенню феромагнітного інтерметаліду Cu_2MnAl , що надає алюмінієвій бронзі магнітних властивостей [8]. Тому, в багатокомпонентній алюмінієвій бронзі доцільно максимальний вміст марганцю обмежити 0,45% з метою уникнення виникнення в структурі бронзи феромагнітного інтерметаліду.

➤ олово – вже невеликий вміст Sn в системі Cu-Al сприяє формуванню в бронзі багатофазної структури, що надає їй ливарних властивостей. За даними [9], олово - активний “регулятор” рівнів механічних властивостей багатофазної алюмінієвої бронзи вміст якого, тим не менш, рекомендовано обмежити 3...4%. В той же час, за даними [10], олово – не типовий легуючий елемент алюмінієвих бронз, який, в порівнянні з залізом, нікелем та марганцем, незначно покращує їх деякі властивості.

➤ цинк – розкислювач для будь-якої бронзи, який підвищує ливарні властивості кремнієвих бронз, знижує лінійну усадку та зменшує інтервал кристалізації, гарячеламкість і газонасиченість олов'яних бронз, поліпшує механічні властивості та якість поверхонь виливків з будь-яких бронз, підвищує їх корозійну стійкість та механічну оброблюваність лезовим інструментом. З точки зору процесу плавки, цинк є небажаним компонентом, що зумовлено токсичністю його пари, яка у великій кількості виникає під час та після введення цинку у розплав [11, 12].

➤ залізо, нікель, кобальт - небажані хімічні елементами для немагнітних бронз, оскільки вони надають бронзам магнітних властивостей. Для забезпечення величини магнітної проникності $\mu_a \leq 1,05$ Гн/м сумарний вміст Fe, Ni та Co в бронзі доцільно обмежити 0,17%.

➤ неминучі домішки, такі як фосфор, миш'як та інші, можуть негативно впливати на структуру і властивості бронзи. Їх загальний вміст має не перевищувати 0,45%, щоб уникнути деградації матеріалу. У цьому контексті особливо важливо щоб сукупний масовий вміст Fe, Ni та Co в сумі неминучих домішок не перевищував 0,17%.

➤ синергетичний вплив елементів через різноманіття комбінацій вмісту легувальних елементів в бронзі дозволяє оптимізувати її хімічний склад за фазовим складом і, завдяки цьому, механічні, технологічні, експлуатаційні, споживчі, корозійні, магнітні та інші різновиди властивостей та показників. Зокрема:

1. Cu-Al – при вмісті алюмінію до 9,25% за масою це однофазні немагнітні корозійностійкі бронзи, які орієнтовані на виготовлення виробів способами ОМТ у зв'язку з їх малою міцністю, великою лінійною усадкою і пластичністю в литому стані.

2. Cu-Al-Si – це однофазні немагнітні корозійностійкі бронзи, які орієнтовані на виготовлення виробів способами ОМТ у зв'язку з їх малою міцністю, високою лінійною усадкою і пластичністю в литому стані, але більш міцні ніж бронзи системи Cu-Al після їх деформаційної обробки.

3. Cu-Al-Fe-Ni – це багатофазні магнітні ливарні бронзи, які мають високі міцність, твердість, корозійну та кавітаційну стійкість, невелику пластичність та лінійну усадку в литому стані, стабілізовану нікелем структуру.

4. Cu-Al-Si-Sn-Mn – це багатофазні бронзи, перспективні як ливарні немагнітні корозійно-стійкі термічно зміцнювані сплави.

За відсутністю даних щодо селективного впливу компонентів бронзи даної системи на її структуру і властивості доцільно прийняти адекватний безрозмірний критерій (масове співвідношення компонентів в бронзі) використання якого дозволить виявити зв'язки між складом і структурою бронз та їх властивостями. При цьому, вміст легуючих елементів доцільно обмежити величинами, які витікають з результатів приведеного вище аналізу селективного впливу обраних легуючих елементів.

Мета роботи

Мета роботи - встановити закономірності синергетичного та селективного впливу легуючих компонентів та умов формування литої термічно не обробленої бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn при масовому вмісті Al=6,0...7,5%, Si=1,0...2,5%, Mn=0,21...0,45%, Sn=1,0...2,2% на її механічні властивості при нормальній температурі, розплав якої був залитий в піщану та сталеву ливарну форму.

Методика досліджень

Дослідження механічних властивостей бронзи проводили при наступному масовому вмісті їх компонентів, %: алюміній – 6,0...7,5, кремній – 1,0...2,5, марганець – 0,21...0,45, олово – 1,0...2,2 та інші домішки (nn) – до 0,45, мідь – залишок.

Для плавки бронз використали: мідь катодна марки М2 (ДСТУ 3211-2009); алюміній марки Al99,7 (ДСТУ ISO 209-1:2002); кремній марки Kp1 (ДСТУ 2963-94); олово марки О1 (ДСТУ EN 610:2004); марганець металевий Mn95 (ГОСТ 6008-90); силікомарганець MnC17 (ДСТУ ГОСТ 16591.4:2009).

Плавку проводили в індукційній печі з графітовим тиглем металоємністю за міддю 15 кг з використанням деревного вугілля. Після розплавлення наважок шихти температуру розплаву в тиглі підвищували до 1250 ± 10 °C, розкислювали марганцем або силікомарганцем і заливали у піщану ливарну форму та сталевий кокіль. Бронзові виливки в піщаних формах охолоджували впродовж 24 годин, в кокілях - впродовж 6...7 хв. З охолоджених виливків вирізали зразки для проведення хімічного аналізу, виміру магнітної проникності та їх лінійних розмірів, металографічних досліджень та досліджень механічних властивостей.

Хімічний склад виплавлених бронз визначали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L. Інтервал температур за яким розраховували середньозважену швидкість охолодження бронзових зразків визначали за результатами проведення диференційного термогравіметричного аналізу (ДТГА) певних зразків бронзи. Аналіз бронзових зразків масою 1,2...1,7 г проводили на синхронному термічному аналізаторі STA 449 C «Jupiter» фірми NETZSCH (Німеччина). У ході аналізу досліджувані зразки бронзи нагрівали з 20 °C до 1220 °C та охолоджували до температури ~250 °C в алундових тиглях із швидкістю 20 °C/хв у середовищі аргону. Інтервал за яким в подальшому

проводили розрахунок швидкості охолодження бронзи відповідав температурному інтервалу, в якому під час охолодження відбувалося формування хімічної сполуки в структурі бронзи.

Швидкості охолодження зразків бронзи проводили розрахунком з використанням термограм їх затвердіння та охолодження в ливарній формі з піщано-рідкоскляної суміші (піщана ливарна форма) та сталевому кокіль з початковою температурою 120 ± 10 °С. Термографування проводили на зразках $16 \times 16 \times 110$ мм за схемою на рис. 1.

Термографування проводили з використанням хромель-алюмелевих термопар, що мали діаметр гарячого спаю термоелектродів до 0,3 мм, та електронного потенціометра з автоматичним записом та архівацією електронних протоколів.

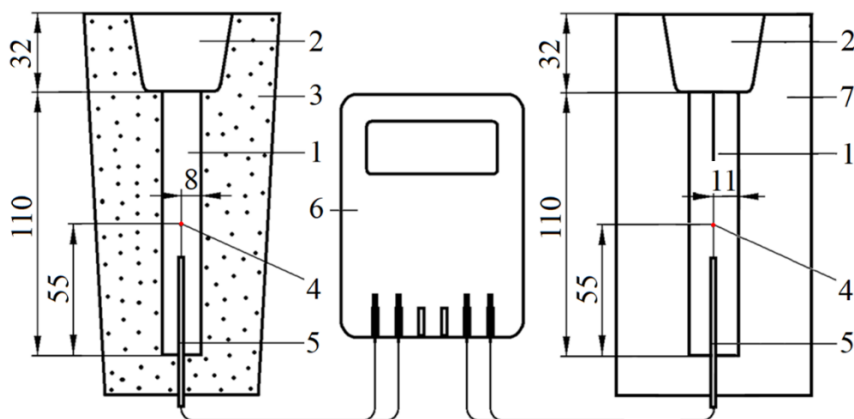


Рисунок 1 – Схема розміщення гарячого спаю термопар в ливарній формі:
1 – виливок (зразок); 2 – надлив; 3 – ливарна форма; 4 – гарячий спай термопар;
5 – керамічна “соломка”; 6 – електронний регістратор температури; 7 – кокіль

Визначення механічних властивостей бронз проводили при 20 ± 1 °С на універсальній випробувальній машині FP-100/1, величину ударної в'язкості розраховували за результатами випробувань зразків на маятниковому копрі PSW-30. Твердість за Брінелем визначали відповідно до ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 на приладі ТШ-2 з навантаженням 2452 Н з кулькою індентора $\varnothing 5$ мм. Для визначення твердості використовували зразки, які вирізали з центральної частини виливків, і за схемою, що схематично представлено на рис. 2.

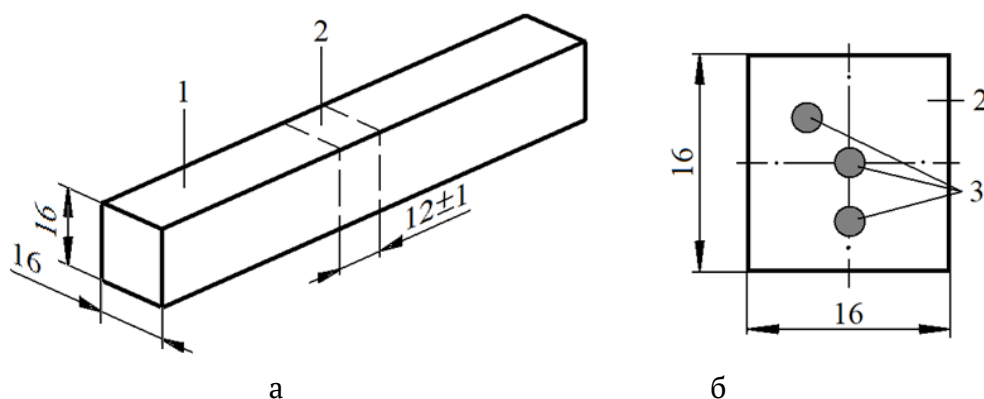


Рисунок 2 – Схема вирізки зразку (а) та місць вимірювання твердості (б):
1 – виливок; 2 – зразок для вимірювання твердості;
3 – місця “наколів” індентора

Для досліджень синергетичного впливу легуючих елементів на механічні властивості за результатами системного аналізу властивостей бронз та експериментальних даних досліджуваної бронзи було прийнято критерій K_R , який являє собою наступне масове співвідношення складових бронзи:

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

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

Виявлення селективного впливу легуючих елементів на механічні властивості бронзи проводили за наступною методикою:

- за результатами експериментальних досліджень будували графічні залежності кожного з обраних показників механічних властивостей від величини критерію K_R ;
- після побудування графічних залежностей за допомогою комп'ютерної програми Excel додавали до кожної з побудованих залежностей лінію їх тренду та визначали їх параметри (вид рівнянь та числові величини їх коефіцієнтів, величини достовірності апроксимації);
- використовуючи рівняння ліній тренду, розраховували величини змін параметрів механічних властивостей, для чого попередньо розраховували величини K_R при послідовній зміні кожного з легуючих компонентів

досліджуваної бронзи в прийнятих межах їх змін при незмінних середніх величинах вмісту в бронзі всіх інших легуючих елементів.

Результати досліджень

Відповідно до прийнятої методики, встановлення температур початку та завершення перетворень структури в бронзах з різною величиною критерію K_R , що були залиті в піщану форму, проводили нагрівання бронзи в приладі ДТГА. Результати проведення ДТГА по нагріванню зразків бронз представлено на рис. 3 та рис. 4.

За результатами ДТГА встановлено, що для досліджуваних бронз в інтервалі змін $K_R=0,35...2,07$ температура ліквідус, як і температурний інтервал кристалізації мало залежні від змін хімічного складу бронз. Тобто, в інтервалі змін $K_R=0,35...2,07$ температура ліквідус знаходиться в межах $\sim 997...1019$ °С, а температурний інтервал кристалізації в межах $\sim 32...48$ °С. В той же час, інтерметалідна фаза в структурі досліджуваних бронз виникає в інтервалі температур $611,2...475$ °С який зі зменшенням величини K_R зростає від 1°С при $K_R=2,07$ та $K_R=0,84$ до 31°С при $K_R=0,46$ і до 108,2 °С при $K_R=0,35$.

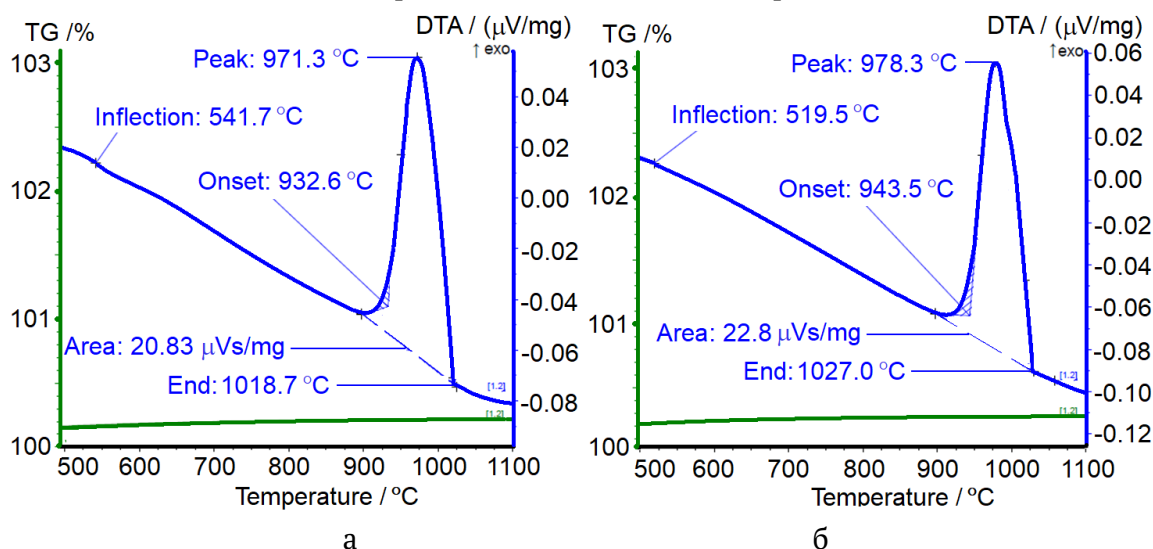
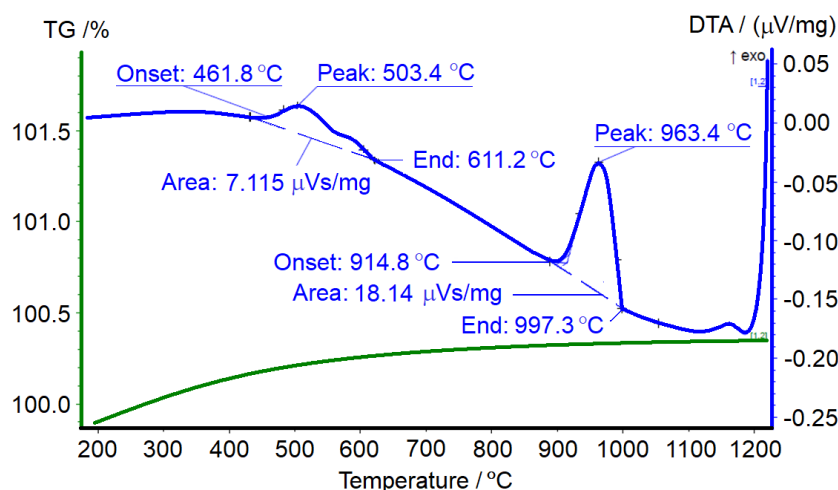
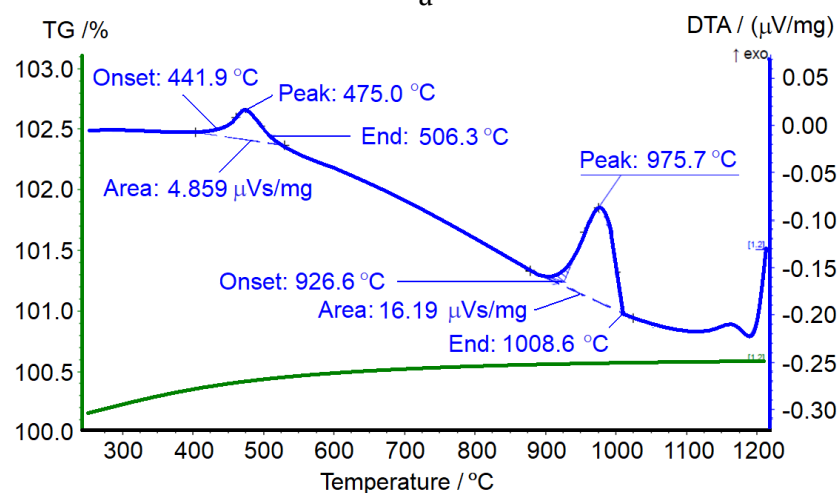


Рисунок 3 – Результати проведення ДТГА бронз з $K_R=2,07$ (а) і $K_R=0,84$ (б) під час їх охолодження зі швидкістю 20 °С/хв в середовищі аргону



a



б

Рисунок 4 – Результати проведення ДТГА бронз з $K_R=0,46$ (а) і $K_R=0,35$ (б) під час їх охолодження зі швидкістю $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ в середовищі аргону

Виходячи з цього, для аналізу впливу швидкості охолодження бронз на їх структуру та властивості, в якості показника швидкості охолодження зразків прийняли середньозважену швидкість зниження температури виливків в інтервалі від 650 до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термограми охолодження виливків в піщаній формі та кокілі, відповідно до схеми на рис. 1, представлено на рис. 5.

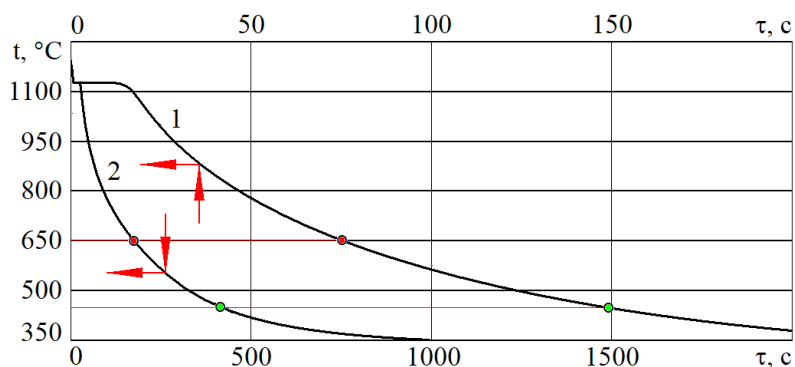


Рисунок 5 – Термограми охолодження зразків бронзи в піщаній формі (1) та кокіль (2)

На основі термограм на рис. 5 провели розрахунки середньозважених швидкостей охолодження бронзових виливків в інтервалі температур від 650 до 400 °С, яка склала $\sim 0,25$ °С/с для виливків, які охолоджувалися в піщаній формі, і $\sim 6,5$ °С/с для виливків, які охолоджувалися в кокіль.

Механічні властивості, величини K_R та ϕ для досліджуваної бронзи, яка була охолоджена в інтервалі 650...400 °С зі швидкістю $w=0,25$ °С/с та $w=6,5$ °С/с приведено в таблиці 2, величини твердості досліджуваної литої бронзи приведено в таблиці 3.

Таблица 2

Механічні властивості, величини K_R та ϕ для бронзи

$w=0,25$ °С/с (піщана форма)						$w=6,5$ °С/с (кокіль)				
Механічні властивості				K_R	ϕ	Механічні властивості				K_R
σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²			σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
206	205	0	5	0,32		513	397	3,7	12,9	0,33
310	295	3	6	0,35	59,1	530	355	4,0	15,2	0,35
362	350	4	10	0,35	59,1	550	310	5,0	19,0	0,4
320	306	7	4	0,41	56,8	507	284	5,6	18,5	0,48
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
421	284	13	18	0,42	56,1	512	313	5,6	19,6	0,50
456	390	5	12	0,44	54,7	482	262	5,9	21,1	0,52
465	332	10	19	0,46	53,1	423	279	5,5	20,7	0,56
482	350	9	20	0,55	43,8	440	275	6,1	22,0	0,61
475	350	11	22	0,61	36,5	401	254	6,1	21,0	0,63
492	285	17	23	0,67	29,1	321	248	6,9	21,4	0,73
504	275	19	28	0,77	18,4	281	235	7,8	22,0	0,76
479	250	28	34	0,84	13,3	265	178	8,4	22,4	0,83

Таблиця 3

Твердість досліджуваної литої бронзи

w=0,25 °C/c (залиття в піщану форму)												
K _R	0,34	0,35	0,41	0,57	0,57	0,68	0,71	0,71	0,74	0,77	0,77	0,86
HB, МПа	1100	1070	1210	1120	1150	900	918	832	870	850	810	770
w=6,5 °C/c (залиття в кокінь)												
K _R	0,35	0,40	0,43	0,46	0,48	0,52	0,56	0,61	0,63	0,73	0,76	0,85
HB, МПа	1190	1158	1200	1148	1078	1040	1015	1000	918	872	830	804

Аналіз даних таблиці 2, з точки зору синергетичного впливу легуючих елементів досліджуваної бронзи, показує, що швидкість охолодження бронзи в ливарній формі в інтервалі температур від 650 до 400 °C впливає на рівень, але не впливає на характер зміни більшості показників її механічних властивостей.

Про це, зокрема, свідчить хід кривих на рис. 6, де представлено залежності σ_B (а), $\sigma_{0,2}$ (б), δ_5 (в) та КСЧ (г) від критерію $K_R=0,32...0,74$ для бронзи, що була залита в піщану ливарну форму (1) і сталевий кокінь (2)

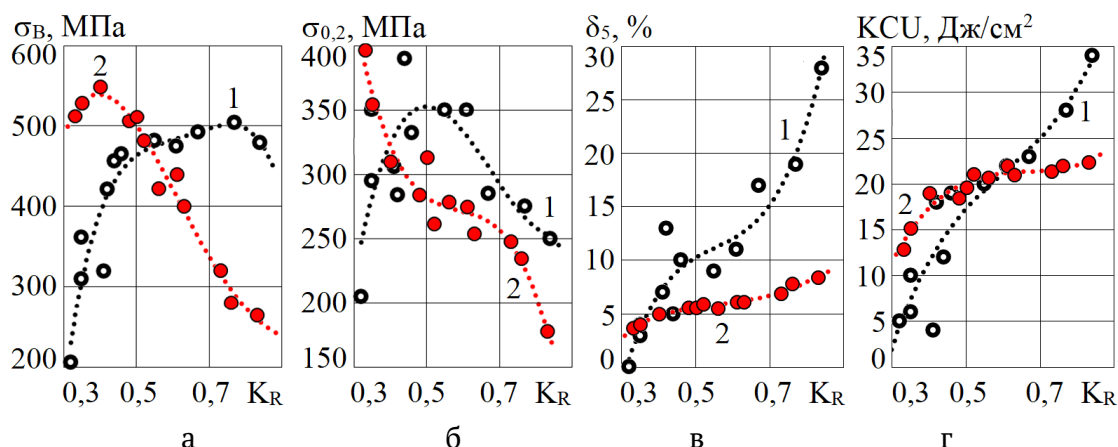


Рисунок 6 – Залежності σ_B (а), $\sigma_{0,2}$ (б), δ_5 (в) та КСЧ (г) від критерію K_R для бронзи, що була залита в піщану ливарну форму (1) і сталевий кокінь (2)

В той же час, хід залежностей рівня границі міцності (див. рис. 6,а) та плинності бронзи (див. рис. 6,б) має деякі відмінності. Зокрема, підвищення швидкості охолодження бронзи (при литті в кокінь) призводить до виникнення екстремуму залежності σ_B з боку менших величин $K_R = 0,4$ порівняно з аналогічним екстремумом для бронз, які були залиті в піщану форму і охолоджувалися зі значно меншою швидкістю ($K_R = 0,75$). Щодо показника

$\sigma_{0,2}$, то співпадіння характеру ходи його залежностей від величини K_R відбувається лише при $K_R \geq 0,5$ (див. рис. 6,б). При цьому, величина показника $\sigma_{0,2}$ для бронз, що залиті в кокіль неухильно знижується в усьому інтервалі змін критерію K_R – від 0,35 до 0,85.

Розбіжності в величинах K_R для екстремумів показника σ_B та взаємопротилежний характер зміни величини $\sigma_{0,2}$ при величині критерію $K_R=0,5$ свідчить про те, що з підвищенням швидкості охолодження бронзи досліджуваної системи кардинально змінюються, як структура, так і, відповідно, характер індивідуального впливу легуючих елементів на її міцність та текучість.

В той же час, підвищення швидкості охолодження литої бронзи знижує синергетичний вплив її хімічного складу на показники пластичності (див. рис. 6,в,г), але не змінює характер впливу. Тобто, показники пластичності бронзи зростають з підвищенням величини критерію K_R .

Для виявлення селективного впливу легуючих елементів на механічні властивості досліджуваної бронзи за даними таблиці 1, отримали математичні моделі у вигляді поліноміальних рівнянь які представлено в таблиці 4.

Таблиця 4

Поліноміальні функції залежностей механічних властивостей
від величини критерію K_R та ввеличини достовірності апроксимації (R^2)

Ливарна форма	Рівняння	R^2
піщана	$\sigma_B = -23117 \cdot (K_R)^4 + 58607 \cdot (K_R)^3 - 55602 \cdot (K_R)^2 + 23537 \cdot K_R - 3286$, МПа	0,88
	$\sigma_{0,2} = 4578 \cdot (K_R)^3 - 9296 \cdot (K_R)^2 + 5864 \cdot K_R - 827$, МПа	0,55
	$\delta_5 = 518,6 \cdot (K_R)^3 - 862 \cdot (K_R)^2 + 494 \cdot K_R - 86$, %	0,91
	$KCU = 292 \cdot (K_R)^3 - 531 \cdot (K_R)^2 + 357 \cdot K_R - 65$, Дж/см ²	0,88
	$\varphi = 491,73 \cdot (K_R)^3 - 913,53 \cdot (K_R)^2 + 441,88 \cdot K_R - 4,735$, %	1,00
сталева (кокіль)	$\sigma_B = 5359 \cdot (K_R)^3 - 10119 \cdot (K_R)^2 + 5480 \cdot K_R - 380$, МПа	0,98
	$\sigma_{0,2} = -5474 \cdot (K_R)^3 + 9679 \cdot (K_R)^2 - 5774 \cdot K_R + 1434$, МПа	0,95
	$\delta_5 = 86,18 \cdot (K_R)^3 - 146,86 \cdot (K_R)^2 + 87,69 \cdot K_R - 12,29$, %	0,97
	$KCU = 189,4 \cdot (K_R)^3 - 377,1 \cdot (K_R)^2 + 252,1 \cdot K_R - 35,25$, Дж/см ²	0,93

Використовуючи рівняння таблиці 4 побудували залежності зміни величини σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ_5 та KCU бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3 від вмісту в ній легуючих

елементів при литті в піщану ливарну форму та сталевий кокінь, які представлено на рис. 7.

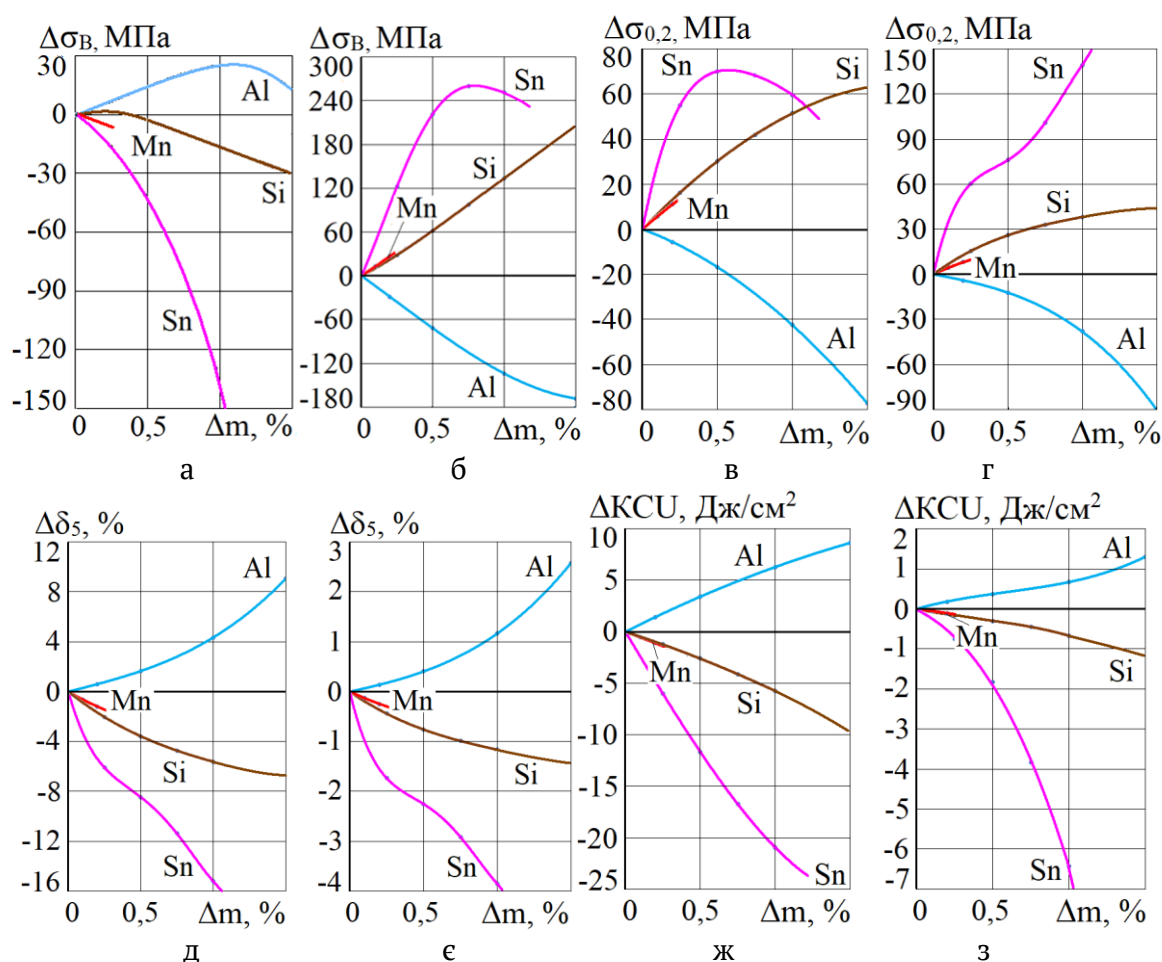


Рисунок 7 – Залежності зміни величин σ_B (а, б), $\sigma_{0.2}$ (в, г), δ_5 (д, е) та KCU (ж, з) бронзи від вмісту в ній легуючих елементів при литті в піщану форму (а, в, д, ж) та кокінь (б, г, е, з)

Поліноміальні функції залежностей твердості за Брінеллем від величини критерію K_R та ввеличини достовірності апроксимації (R^2) приведено в таблиці 5, а залежності твердості бронзи, яка була залита в піщану форму та кокінь, від величини критерію K_R та від зміни масового вмісту легуючих компонентів бронзи представлені на рис. 8.

Таблиця 5

Поліноміальні функції залежностей механічних властивостей від величини критерію K_R та величини достовірності апроксимації (R^2)

$w=0,25\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ (залиття в піщану форму)	
$HB=-15274\cdot(K_R)^4+53652\cdot(K_R)^3-64723\cdot(K_R)^2+31210\cdot K_R-3965$	$R^2=0,96$
$w=6,5\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ (залиття в кокінь)	
$HB=4895\cdot(K_R)^3-8404\cdot(K_R)^2+3708\cdot K_R+721$	$R^2=0,97$

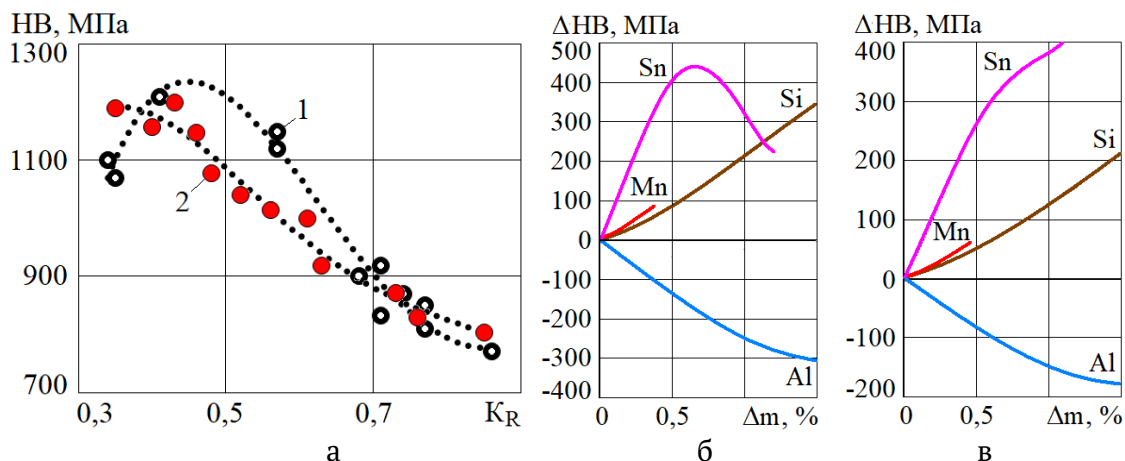


Рисунок 8 – Залежність твердості термічно не обробленої бронзи, яка була залита в піщану форму (1) та кокінь (2), від величини критерію K_R (а), та від зміни масового вмісту легуючих компонентів бронзи, яка була залита в піщану форму (б) та кокінь (в)

Аналіз ходу залежностей на рис. 7, а, б свідчить, що при литті бронзи в піщану ливарну форму на величину σ_B найбільш впливає лише олово з підвищенням вмісту якого межа міцності при розтягуванні знижується. При цьому Si та Mn також знижують межу міцності бронз, а Al її підвищує лише до масового вмісту 6,5%.

При литті в кокінь навпаки – суттєвому зниженню величини σ_B сприяє Al, а з підвищенням вмісту Sn до 1,75%, Si та Mn величина σ_B значно зростає. При масовому вмісті 1,75% і більше Sn знижує величину показника σ_B .

На відміну від показника σ_B , рівень показника $\sigma_{0,2}$ зростає з підвищенням в бронзі вмісту Si і Mn та зі зниженням вмісту Al за будь-якої швидкості охолодження бронзи у ливарній формі. Щодо Sn, то підвищення його вмісту в бронзі, яка залита в піщану форму, лише на 0,5%, сприяє зростанню $\sigma_{0,2}$, а при подальшому додаванні олова – обумовлює зменшення цього показника. При

литті в сталевий кокіль Sn є єдиним легуючим елементом, який найбільш значно і за будь яким вмістом, в межах марки досліджуваної бронзи, підвищує рівень показника $\sigma_{0,2}$.

Аналіз ходу залежностей на рис. 7, д...з свідчить, що, незалежно від швидкості охолодження бронзи в ливарній формі, вплив легуючих елементів на показники пластичності (δ_5 , KCU) ідентичний, хоча і різний за ступенем впливу. Підвищення вмісту Al в бронзі приводить до зростання як її показника δ_5 , так і показника KCU. В свою чергу, Sn, Si та Mn знижують рівень цих показників.

Найбільшою мірою зниженню показників пластичності сприяє Sn. При цьому, вказаний характер впливу легуючих елементів більшою мірою притаманній бронзі, яка була залита в піщану форму, ніж в кокіль. Тобто, з підвищенням швидкості охолодження литої бронзи в ливарній формі характер впливу легуючих компонентів бронзи на її показники пластичності залишається незмінним, а ступінь їх впливу - зменшується.

Залежності твердості за Брінеллем термічно не обробленої бронзи, яка була залита в піщану форму та кокіль, від величини критерію K_R (див. рис. 8,а), та від зміни масового вмісту легуючих компонентів бронзи, яка була залита в піщану форму (див. рис. 8,б) та кокіль (див. рис. 8,в) ідентичні за ходом, але, як і в попередніх випадках, ступінь їх впливу - зменшується зі збільшенням величини критерію K_R (див. рис. 8,а) і зі збільшенням швидкості охолодження бронзи в ливарній формі. При цьому, найбільш значущий вплив на підвищення твердості демонструють Sn та Si. Зниженню твердості сприяє підвищення вмісту в бронзі алюмінію.

По суті, отримані дані по селективному впливу легуючих елементів на величини механічних властивостей досліджуваної бронзи є зіставними до результатів їх синергетичного впливу. Це свідчить про те, що досліджувана бронза настільки чутлива до швидкості її охолодження в ливарній формі, що це, як на синергетичному, так і селективному рівні, призводить до інверсії характеру впливу легуючих елементів на показники міцності бронзи. З цього витікає, що у досліджуваній бронзі є два суттєві важелі управління її структурою і, відповідно,

рівнем показників механічних властивостей, а саме - її хімічний склад та швидкість її охолодження в ливарній формі. Про це, зокрема, свідчать залежності на рис. 9.

Аналіз ходу залежності на рис. 9,а свідчить, що зі збільшенням величини критерію K_R від 0,35 до 0,85 відносний об'єм інтерметалідних фаз в структурі бронзи зменшується з 59% до 13%, що відповідним чином впливає на величини показників її механічних властивостей та твердість. В той же час (див. рис. 9,б) відносний об'єм хімічної сполуки в структурі бронзи зменшується з підвищенням в ній (в межах марочного складу) вмісту Al і зі зниженням вмісту Si, Mn та, особливо, Sn.

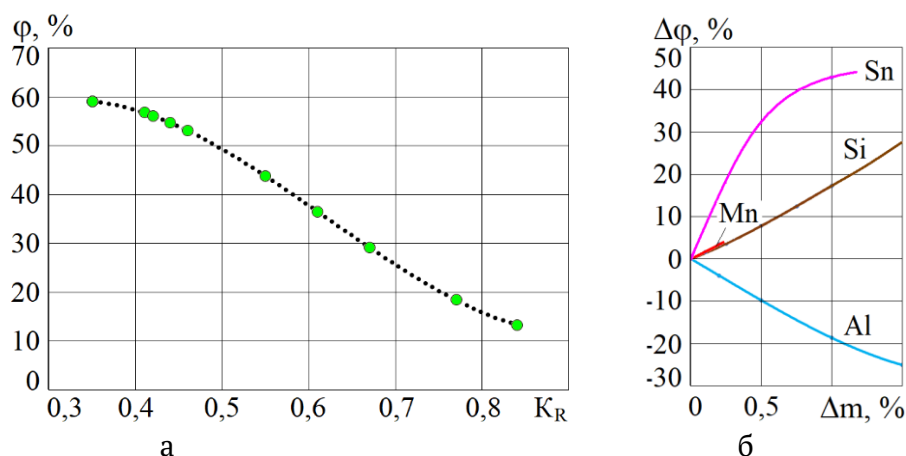


Рисунок 9 – Залежність об'ємної долі інтерметалідної сполуки в структурі досліджуваної бронзи, що була залита в піщану форму, від величини критерію K_R (а) та зміни масової кількості її легуючих елементів (б)

Висновки

1. Синергетичний та селективний вплив легуючих елементів на міцність та плинність бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn не однозначний і визначається більшою мірою швидкістю охолодження бронзи в ливарній формі.

2. Підвищення швидкості охолодження бронзи в ливарній формі призводить до інверсії характеру селективного впливу легуючих компонентів на міцність, що, вірогідно, пов'язано зі зміною типу структури бронз. Тобто, пластичні властивості бронзи залежні від швидкості її охолодження. При цьому швидкість охолодження впливає лише на ступінь зміни цих показників, але не впливає на їх характер.

3. З підвищенням швидкості охолодження бронзи в ливарній формі ступінь синергетичного та селективного впливу легуючих елементів на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn зменшується.

4. З числа легуючих елементів в бронзах системи Cu-Al-Si-Sn-Mn за характером впливу на рівень механічних властивостей, твердості та долі хімічної сполуки в структурі досліджуваної бронзи алюміній є антиподом до олова, кремнію та марганцю.

5. Об'ємна доля інтерметалідної фази в структурі досліджуваної бронзи, що була залита в піщану форму, зменшується від 59 до 13% за об'ємом зі збільшенням величини критерію K_R від 0,35 до 0,85.

6. Об'ємна доля хімічної сполуки в структурі досліджуваної бронзи, що була залита в піщану форму, зростає з підвищенням вмісту в бронзі марганцю, кремнію і, особливо, олова. Підвищення вмісту алюмінію в бронзі знижує долю інтерметалідної фази в її структурі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Composition and properties of aluminum bronze. URL : <https://shop.machinemfg.com/composition-and-properties-of-aluminum-bronze>.
2. Aluminum Bronze: Comprehensive Guide Its Superior Properties. Metal3DP. URL : <https://met3dp.com/aluminum-bronzecomprehensive-guide-superior-properties/>.
3. Official Site of Copper Development Association, Inc. (USA). URL : https://dev.copper.org/publications/newsletters/innovations/2002/08/aluminum_bronze.pdf.
4. Understanding Aluminum Bronze. URL : <https://shop.machinemfg.com/understanding-aluminum-bronze/>.
5. Powell C., Webster P. Copper Alloys for Marine Environments. New York : Copper Development Association, 2012. 29 p.
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. Copper.org - C95600 Alloy. Advanced Search for Wrought and Cast Copper Alloys. URL: <https://alloys.copper.org/alloy/C95600>.
8. Magnetic Behavior of Bronze: How Magnetic Are Bronze Alloys? - BOYI. BOYI. URL: <https://www.boyiprototyping.com/materials-guide/is-bronze-magnetic/>.
9. 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. Теорія і практика металургії. 2021. № 6 (131). С. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2021.05>.
10. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Реп'ях С. І., Солоненко Л. В. Оптимізація вмісту олова та алюмінію в олов'яній бронзі за показниками механічних властивостей. Металознавство та термічна обробка металів. 2022. Т. 2. № 2 (97). С. 41–54. DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.050722.41.858.

11. Korinko P. S. Bronze Alloy Development for Zinc Vapor Capture. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2017. Vol. 17, no. 3. P. 490–495. URL: <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0265-8> (date of access: 15.03.2025)..
12. Zinc Essentiality, Toxicity, and Its Bacterial Bioremediation: A Comprehensive Insight / S. Hussain et al. *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.900740>.

REFERENCES

1. Composition and properties of aluminum bronze. URL : <https://shop.machinemfg.com/composition-and-properties-of-aluminum-bronze>.
2. Aluminum Bronze: Comprehensive Guide Its Superior Properties. Metal3DP. URL : <https://met3dp.com/aluminum-bronze-comprehensive-guide-superior-properties/>.
3. Official Site of Copper Development Association, Inc. (USA). URL : https://dev.copper.org/publications/newsletters/innovations/2002/08/aluminum_bronze.pdf.
4. Understanding Aluminum Bronze. URL : <https://shop.machinemfg.com/understanding-aluminum-bronze/>.
5. Powell C., Webster P. *Copper Alloys for Marine Environments*. New York : Copper Development Association, 2012. 29 p.
6. Gresha V.L., Lysitsya O.V., Stepanova L.P. *Nonferrous metals and alloys based on them: a textbook*. Zaporizhzhia: ZNTU, 2014. 286 p.
7. Copper.org - C95600 Alloy. Advanced Search for Wrought and Cast Copper Alloys. URL: <https://alloys.copper.org/alloy/C95600>.
8. Magnetic Behavior of Bronze: How Magnetic Are Bronze Alloys? - BOYI. BOYI. URL: <https://www.boyiprototyping.com/materials-guide/is-bronze-magnetic/>.
9. 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. Theory and practice. 2021. № 6 (131). P. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2021.05>.
10. Kimstach T.V., Uzlov K.I., Repyakh S.I., Solonenko L.I. Optimization of tin and aluminum content in tin bronze according to mechanical properties indicators. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*. 2022. V. 2. № 2 (97). P. 41–54. DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.050722.41.858.
11. Korinko P. S. Bronze Alloy Development for Zinc Vapor Capture. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2017. Vol. 17, no. 3. P. 490–495. URL: <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0265-8> (date of access: 15.03.2025)..
12. Zinc Essentiality, Toxicity, and Its Bacterial Bioremediation: A Comprehensive Insight / S. Hussain et al. *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.900740>.

Received 11.04.2025.

Accepted 14.05.2025.

UDC 691.735:620.173.2

Tetiana Kimstach, Kostiantyn Uzlov

ALLOYING ELEMENTS SYNERGIC AND SELECTIVE EFFECT ON MECHANICAL PROPERTIES OF CU-AL-SI-SN-MN SYSTEM BRONZE

Abstract. Alloying elements synergic and selective effects on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system cast bronze, which melt was poured and cooled into sand and steel molds, studies results are presented.

Purpose – to establish regularities of Cu-Al-Si-Sn-Mn system alloying components synergic and selective influence and conditions for forming cast, non-heat-treated bronze with mass content of aluminum - 6.0...7.5%, silicon - 1.0...2.5%, manganese - 0.21...0.45%, tin - 1.0...2.2% on its mechanical properties at normal temperature, which melt has been poured into sand and steel casting mold.

To determine studied bronze chemical composition complex influence on its mechanical properties, criterion K_R has been used. Cast bronzes chemical composition has been determined on EXPERT 4L precision analyzer. Temperature interval for which bronze samples average-weighted cooling rate was calculated has been determined based on differential thermogravimetric analysis results, which has been performed on synchronous thermal analyzer STA 449 C «Jupiter», NETZSCH Co. (Germany). Bronzes mechanical properties have been determined based on samples destruction results on FP-100/1 machine and PSW-30 pendulum impactor. Brinell hardness has been determined on a TIII-2 device.

It has been established that alloying elements synergistic and selective effect on Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronzes strength limit and yield strength are mainly determined by bronze cooling rate in casting mold, which increasing leads to alloying components selective effect character inversion on strength. Chemical elements selective influence nature on yield strength and hardness only partially changes in relation to tin and does not affect the changes nature in bronze plasticity indicators at all. At the same time, with bronze cooling rate increasing in casting mold, degree of alloying elements synergic and selective influence on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronze decreases. Among alloying elements in Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronzes, in terms of influence on mechanical properties level nature, hardness and chemical compounds in studied bronze structure amount, aluminum is antipode to tin, silicon, and manganese.

Keywords: bronze, strength, plasticity, hardness, properties, aluminum, die mold, sand mold, magnetic permeability

Кімстач Тетяна Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Матеріалознавства та термічної обробки металів», Український державний університет науки і технологій. E-mail: 1375tatyana@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8993-201X>

Узлов Костянтин Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Матеріалознавства та термічної обробки металів», Український державний університет науки і технологій. E-mail: konst.uzlov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0744-9890>

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 Science and Technologies. E-mail: 1375tatyana@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8993-201X>

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. E-mail: konst.uzlov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0744-9890>