

Кімстач Т.В., Узлов К.І., Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Хричиков В.Є., Білий О.П.,
Білий А.П., Іванова Л.Х

Дослідження впливу домішок в бронзі BrO3A3 на її механічні властивості

Kimstach T., Uzlov K., Solonenko L., Repyakh S., Khrychikov V., Bilyi O., Bilyi A.,
Ivanova L.

INVESTIGATION OF IMPURITIES IN BRONZE BrO3A3 INFLUENCE ON ITS MECHANICAL PROPERTIES

Анотація. Постановка проблеми. Дослідити вплив основних легуючих компонентів Sn, Al по 3...4% кожного без урахування впливу домішок, а також кремнію, заліза, цинку та свинцю в бронзі системи Cu-Sn-Al на її механічні властивості. **Мета.** Встановити припустимі концентрації домішок кремнію, заліза, цинку та свинцю в бронзі системи Cu-Sn-Al при вмісті олова та алюмінію 3...4% кожного. **Методика.** Сплави для досліджень готували сплавленням первинних шихтових матеріалів технічної чистоти в індукційній печі тигельній з використанням графітового тигля і деревного вугілля в якості покривного матеріалу. Механічні властивості досліджуваних сплавів розраховували за результатами випробувань відповідних зразків при їх статичному розтягуванні і ударному вигині при кімнатній температурі відповідно до діючих стандартів. Мікроструктурні дослідження проводили на металографічних мікрошліфах, приготовлених за стандартними методиками на оптичному мікроскопі Neophot-21. Контроль хімічного складу сплавів здійснювали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L на зразках, вирізаних з тріфонових проб. Оцінку ступеня впливу кожної з домішок на механічні властивості оцінювали за коефіцієнтами регресії завдяки вирішенню системи відповідних лінійних рівнянь методом Г. Крамера. **Результати та їх обговорення.** За результатами досліджень у роботі встановлені припустимі концентрації домішок кремнію, заліза, цинку та свинцю в бронзі системи Cu-Sn-Al при оптимальному вмісті олова та алюмінію 3...4% кожного. **Висновки.** Вперше встановлено вплив оптимальної кількості легуючих компонентів (Sn, Al по 3...4% кожного) без урахування впливу домішок, а також домішок кремнію, заліза, цинку та свинцю в бронзі BrO3A3 на її механічні властивості. Практичне використання одержаних закономірностей при приготуванні бронзи BrO3A3 є запорукою отримання виливків з заданим рівнем властивостей. **Ключові слова:** олов'яні бронзи, алюмінієві бронзи, домішки, механічні властивості, коефіцієнти регресії, мікроструктура, інтерметаліди сполучення

Abstract. Problem statement. To investigate the influence of main alloying components Sn, Al on 3... 4% each without taking into account impurities influence, as well as silicon, iron, zinc and lead in Cu-Sn-Al system bronze on its mechanical properties. **Purpose.** To establish permissible concentrations of silicon, iron, zinc and lead impurities in Cu-Sn-Al system bronze at tin and aluminum content each of 3... 4%. **Material and methods.** Alloys for investigation have been prepared by melting of technical purity primary charge materials in crucible induction furnace using graphite crucible and charcoal as coating material. Studied alloys mechanical properties have been calculated based on experimental samples tests results during their static expansion and impact bending at room temperature in accordance with actual standards. Microstructural studies have been performed on metallographic specimens prepared by standard methods on optical microscope Neophot-21. Alloys chemical composition control has been carried out using precision analyzer EXPERT 4L on samples cut from club-shaped samples. Estimation of each impurity influence level on mechanical properties has been estimated according to regression coefficients due to system of corresponding linear equations solving by G. Cramer method. **Results and discussion.** According to research results, in this work permissible concentrations impurities of silicon, iron, zinc and lead in Cu-Sn-Al system bronze have been detected at optimal content of tin and aluminum 3... 4% each. **Conclusions.** For the first time, alloying components (Sn, Al on 3... 4% each) optimal amount influence without impurities effect, as well as impurities of silicon, iron, zinc and lead in bronze BrO3A3 on its mechanical properties has been established. Practical implementation of received regularities for bronze BrO3A3 preparation is the key to obtaining castings with given level of properties.

Keywords: tin bronze; aluminum bronze; impurities; mechanical properties; regression coefficients; microstructure; intermetallic compounds

Вступ. Постійний розвиток сучасної промисловості диктує необхідність підвищення експлуатаційної надійності і довговічності роботи, економічності обслуговування в процесі експлуатації і зниження собівартості деталей з бронз. У зв'язку з цим, дослідження, які направлені на вибір і впро-

вадження ефективних складів бронз з метою забезпечення найпривабливіших показників механічних та експлуатаційних властивостей, є актуальним.

Одним із можливих шляхів підвищення властивостей бронз є відповідне легування, та обмежен-

Кімстач Тетяна Володимирівна – УДУНТ
Узлов Костянтин Іванович – д.т.н., проф. УДУНТ
Солоненко Людмила Ігорівна – к.т.н., доц. УДУНТ
Реп'ях Сергій Іванович – д.т.н., ст. доц. УДУНТ
Хричиков Валерій Євгенович – д.т.н., проф. УДУНТ
Білий Олександр Петрович – к.т.н., доц. УДУНТ
Білий Андрій Петрович – аспир. УДУНТ
Іванова Людмила Харитонівна – д.т.н., проф. УДУНТ

Kimstach Tetiana Volodymyrivna – USUST
Uzlov Kostiantyn Ivanovych – d.t.s., prof. USUST
Solonenko Liudmyla Ihorivna – c.t.s., USUST
Repyakh Serhii Ivanovych – d.t.s., USUST
Khrychikov Valerii – d.t.s., USUST
Bilyi Oleksandr Petrovych – c.t.s., USUST
Bilyi Andrii Petrovych – USUST
Ivanova Lydmila - d.t.s., prof. USUST

ня вмісту домішок. У роботах [1-10] показано значний вплив домішок на властивості бронз. Таким чином, встановлення функціональних залежностей між показниками механічних властивостей та вмістом в олов'яній бронзі домішок представляє значний інтерес з наукового та практичного погляду.

Стан питання. У роботі [1] надані результати досліджень впливу легуючих елементів на фізико-механічні властивості олов'яної бронзи з вмістом Sn 6 % (мас.). Встановлено, що в олов'яній бронзі алюміній підвищує твердість та мікротвердість структурних складових, суттєво знижує її теплопровідність. На думку авторів роботи [1] підвищення твердості олов'яної бронзи, легованої зростаючою кількістю алюмінію до 12,5 мас.%, зумовлено збільшенням мікротвердості α -твердого розчину внаслідок підвищення його легованості (максимальна розчинність алюмінію в α -Cu фазі 9,4 мас.% Al, за даними [11]), наявністю у структурі високотвердої евтектоїдної складової та, у випадку наявного дослідження, ще і створенням в сплаві інтерметалідних сполук ендегенного походження. Тобто, на думку авторів [1], теплопровідність олов'яної бронзи постійно знижується в міру легування внаслідок спотворення кристалічних ґрат α -твердого розчину та появи евтектоїдних складових.

Збільшення вмісту кремнію до 5,0 % (мас.) різко підвищує твердість олов'яної бронзи. Основною причиною різкого підвищення твердості бронзи при легуванні кремнієм є збільшення частки легованого кремнієм та оловом евтектоїду з високою мікротвердістю (3200...3500 МПа). Вплив Si на теплопровідність є аналогічним впливу Al [1].

Таблиця 1 – Вплив хімічних елементів-домішок на механічні, технологічні та експлуатаційні властивості олов'яних та алюмінієвих бронз

Властивості	Домішки										
	P	S	Fe	Ni	Mn	Al	Zn	Si	Pb	O	
Олов'яні бронзи [2,4-8]											
Міцність	+	–	+	+	–	–	+	–/+	–	–	
Пластичність	–/+	–		+	–	–		–	–	–	
Рідкоплинність	+	–	–			–	+	–	+	–	
Тріщиностійкість	–	–	–			–		–			
Газонасиченість			–								
Пористість виливків							–			+	
Корозійна стійкість			–	+	+	–/+		–		–	
Триботехнічні властивості	+								+	–	
Подрібнення структури			+								
Властивості	Домішки										
	P	Fe	Pb	Mn	Ni	Zn	Si	Ti	S	Sn	As
Алюмінієві бронзи [4,5,7,8-10]											
Міцність	–	+		+	+	–	–	+	–	–	–
Пластичність	–	–		+	+	–	–		–		–
Рідкоплинність	+					+	+			0	
Тріщиностійкість											
Газонасиченість						+		–			
Пористість виливків							+	–	+		+
Корозійна стійкість	–			+	+	–					
Триботехнічні властивості			+	+							
Подрібнення зерна		+						+			

Примітки. + підвищує, – знижує, 0 – не впливає

Домішки алюмінію та кремнію підвищують гарячеламкість бронз, утворюють оксидні плівки (протектори від корозії) в бронзових виливках. Добавки алюмінію (до 0,2...0,3%) покращують якість поверхні виливків, підвищують їх корозійну стійкість. При вмісті алюмінію в межах 0,5...1,0% рідкоплинність бронзи різко зростає, але потім значно зменшується. На думку авторів [2] домішки алюмінію та кремнію знижують щільність та механічні властивості мідних сплавів. Шкідливими для ливарних олов'яних бронз є домішки кисню, який знижує антифрикційні властивості. Невелика кількість Zr, Ti, Nb поліпшує механічні властивості бронз.

На підставі вивчення [3] впливу малих добавок Al-Ti-B на механічні та експлуатаційні властивості олов'яної бронзи із вмістом Sn 6 % (мас.) встановлено, що зі збільшенням кількості модифікуючої добавки Al-Ti-B зростає твердість олов'яної бронзи внаслідок збільшення мікротвердості α -твердого розчину та евтектоїду, при цьому водночас зростає зносостійкість.

Вплив хімічних елементів-домішок на механічні, технологічні та експлуатаційні властивості олов'яних та алюмінієвих бронз надано в табл. 1 [2, 4-10].

Аналіз даних табл. 1 та результатів досліджень інших вчених та дослідників [1-10] свідчить про те, що вплив домішок на властивості олов'яних та алюмінієвих бронз має різновекторний характер. При цьому, на даний час відсутні дані про вплив домішок на властивості олов'яно-алюмінієвих бронз з вмістом легуючих компонентів 3...4% (мас.) кожного.

Таким чином, робота, яка спрямована на дослідження закономірностей формування та змін властивостей олов'яно-алюмінієвих низьколегованих бронз, завдяки чому, досягнення комплексного поєднання в таких сплавах кращих значень рівнів властивостей та експлуатаційних показників, на сьогодні є актуальною.

Мета і завдання досліджень. Мета роботи - встановлення припустимих концентрацій домішок кремнію, заліза, цинку та свинцю в бронзі системи Cu-Sn-Al при вмісті олова та алюмінію 3...4% кожного. Завдання дослідження – за результатами обробки експериментальних даних щодо механічних властивостей, дослідити вплив домішок кремнію, заліза, цинку та свинцю в бронзі системи Cu-Sn-Al при вмісті до 6,7% (мас.) олова та до 8,1 (мас.) алюмінію, а також легуючих компонентів (Sn, Al по 3...4% кожного) на її механічні властивості без урахування впливу домішок.

Матеріали, методи та методики досліджень. У дослідженнях використовували мідь марки М1 та сплави системи Cu-Al-Sn з масовим вмістом Al до 8,13 % (мас.) та Sn до 6,73% (мас.). Сплави готували сплавлянням первинних шихтових матеріалів технічної чистоти в індукційній печі тигельній з використанням графітового тигля і деревного вугілля в якості покривного матеріалу. Температуру вимірювали хромель-алюмелевою термопарою у комплекті з потенціометром АТ4208.

Механічні властивості досліджуваних сплавів розраховували за результатами випробувань відповідних зразків при їх статичному розтягуванні і ударному вигині. Зразки для випробувань виготовляли механічною обробкою брусків з тріфевидної проби, яку одержували zalиванням розплаву в піщано-рідкоскляні форми (ПРФ), що мали вміст рідкого скла (РС) 5% за масою. Виготовляли ПРФ набиванням піщано-рідкоскляної суміші з подальшим вилученням зі стрижневого ящика та сушінням в мікрохвильовому середовищі протягом 7 хвилин. Після механічної обробки брусків, зразки для випробувань на ударний вигин відповідали вимогам ISO 148-1:2016 [12], зразки на статичне розтягування відповідали вимогам ДСТУ ISO 6892-1:2019 [13].

Випробування зразків на ударний вигин проводили при температурі 20 °С відповідно до вимог ISO 148-1:2016 [12], на маятниковому копрі марки PSW 30 з максимальною енергією удару 300 Дж. Випробування на статичне розтягування проводили на універсальній випробувальній машині FP100/1, оснащеною системою автоматичного запису діаграми розтягування з визначенням параметрів тимчасового опору руйнуванню при розтягуванні (σ_B) і умовної границі плинності ($\sigma_{0,2}$) при зусиллі 40 кН, швидкості переміщення траверси 1 мм/хв. та температурі 20 °С. Відносне подовження (δ_5) та звуження (ψ) розраховували за результатами вимірювання довжин та діаметрів робочої частини зразків до та після їх випробувань штангенциркулем з точністю 0,02 мм.

Мікроструктурні дослідження проводили на металографічних мікрошліфах, приготовлених за стандартними методиками [14, 15] на оптичному мікроскопі Neophot-21.

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

Вплив домішок на механічні властивості оцінювали за експериментальними даними, припускаючи, що в межах масового вмісту кожної з домішок з 0 до 0,6% за масою такі залежності мають лінійний характер і, отже, можуть бути описані рівнянням лінійного типу наступного виду :

$$y_i = A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + A_3 \cdot x_3 + A_4 \cdot x_4 + A_5 \cdot x_5 + A_6 \cdot x_6 + A_7 \cdot x_7, \quad (1)$$

де $A_1 \dots A_7$ - коефіцієнти регресії;
 $x_1 \dots x_7$ – масова частка компонента бронзи%.

Оцінкою ступеня впливу кожної з домішок на механічні властивості бронзи були величини коефіцієнтів регресії у рівнянні (1), які розраховували внаслідок вирішення системи відповідних лінійних рівнянь методом Крамера [16].

Результати досліджень. Виходячи з прийнятої методики в дослідженнях були визначені механічні властивості бронз, хімічний склад яких та отримані величини механічних властивостей приведені в табл. 2.

Таблиця 2 - Масовий вміст хімічних елементів в бронзах та їх механічні властивості

Масовий вміст хімічних елементів в бронзі, %							Механічні властивості			
Cu	Al	Sn	Si	Fe	Zn	Pb	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	y_1	y_2	y_3	y_4
87,19	5,39	5,96	0,84	0,327	0,264	0,029	378	250	8	14
87,92	5,64	5,73	0,22	0,2	0,098	0,192	403	265	8,2	13
89,62	4,69	4,98	0,14	0,038	0,532	0	270	155	13,1	28
89,32	4,69	5,07	0,16	0,052	0	0,708	238	177	13,3	26
88,86	5,89	4,01	0,5	0,497	0,191	0,052	341	187	15	35
95,3	3,11	1,42	0,04	0,13	0	0	233	93	37	172
95,1	1,47	3,3	0,02	0,11	0	0	283	127	33,4	150

Обробку даних табл.2 проводили шляхом вирішення наступної системи лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} y_1 = A_1 \cdot 87,19 + A_2 \cdot 5,39 + A_3 \cdot 5,96 + A_4 \cdot 0,84 + A_5 \cdot 0,327 + A_6 \cdot 0,264 + A_7 \cdot 0,029, \\ y_2 = A_1 \cdot 87,92 + A_2 \cdot 5,64 + A_3 \cdot 5,73 + A_4 \cdot 0,22 + A_5 \cdot 0,200 + A_6 \cdot 0,098 + A_7 \cdot 0,192, \\ y_3 = A_1 \cdot 89,62 + A_2 \cdot 4,69 + A_3 \cdot 4,98 + A_4 \cdot 0,14 + A_5 \cdot 0,038 + A_6 \cdot 0,532 + A_7 \cdot 0,000, \\ y_4 = A_1 \cdot 89,32 + A_2 \cdot 4,69 + A_3 \cdot 5,07 + A_4 \cdot 0,16 + A_5 \cdot 0,052 + A_6 \cdot 0,000 + A_7 \cdot 0,708, \\ y_5 = A_1 \cdot 88,86 + A_2 \cdot 5,89 + A_3 \cdot 4,01 + A_4 \cdot 0,50 + A_5 \cdot 0,497 + A_6 \cdot 0,191 + A_7 \cdot 0,052, \\ y_6 = A_1 \cdot 95,30 + A_2 \cdot 3,11 + A_3 \cdot 1,42 + A_4 \cdot 0,04 + A_5 \cdot 0,130 + A_6 \cdot 0,000 + A_7 \cdot 0,000, \\ y_7 = A_1 \cdot 95,10 + A_2 \cdot 1,47 + A_3 \cdot 3,30 + A_4 \cdot 0,02 + A_5 \cdot 0,110 + A_6 \cdot 0,000 + A_7 \cdot 0,000. \end{cases}$$

Результати вирішення даної системи лінійних рівнянь надано в табл. 3.

Таблиця 3 - Коефіцієнти в лінійних рівняннях

Коефіцієнти в лінійних рівняннях, A_i							Показник механічних властивостей
Cu	Al	Sn	Si	Fe	Zn	Pb	
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	
0,9367	23,19	46,95	-51,59	53,87	-284,5	-264,1	σ_B
-0,2603	23,29	27,75	6,975	-65,56	-220,7	-138,6	$\sigma_{0,2}$
0,5339	-2,552	-4,083	1,745	-1,665	-4,937	-2,698	δ
2,568	-10,70	-21,29	31,46	-80,86	-88,91	-65,13	KCU

По суті, коефіцієнти A_i в табл. 3 ($A_1 \dots A_7$) є коефіцієнтами впливу 1% за масою того чи іншого хімічного елемента в складі олов'яно-алюмінієвої бронзи в зазначених вище межах. Відповідно до

цього, для олов'яно-алюмінієвої бронзи на рис. 1 надані залежності індивідуального впливу кремнію, заліза, цинку та свинцю на механічні властивості цієї бронзи.

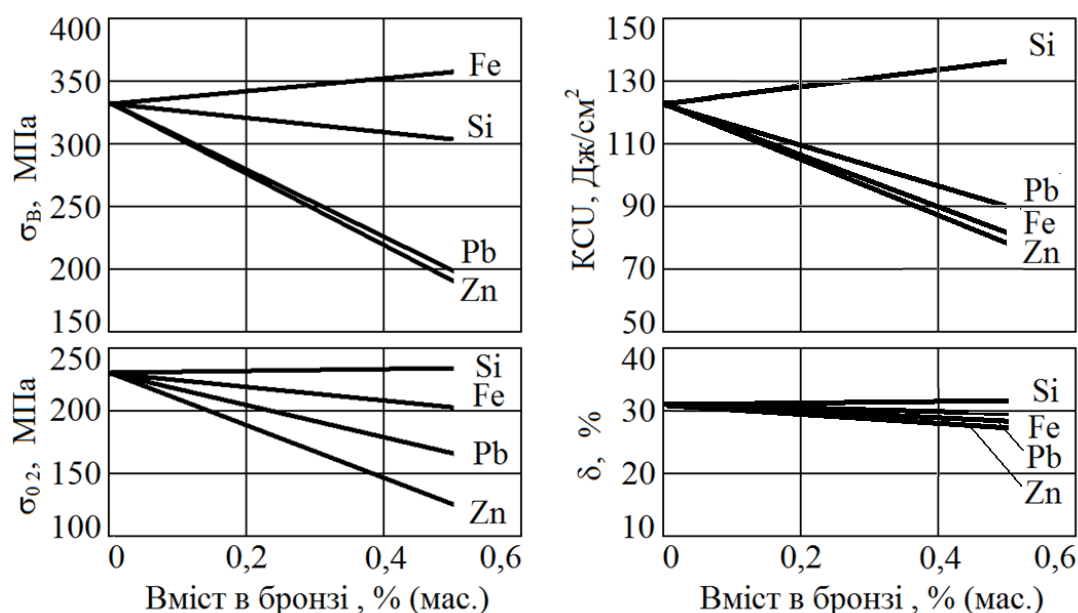
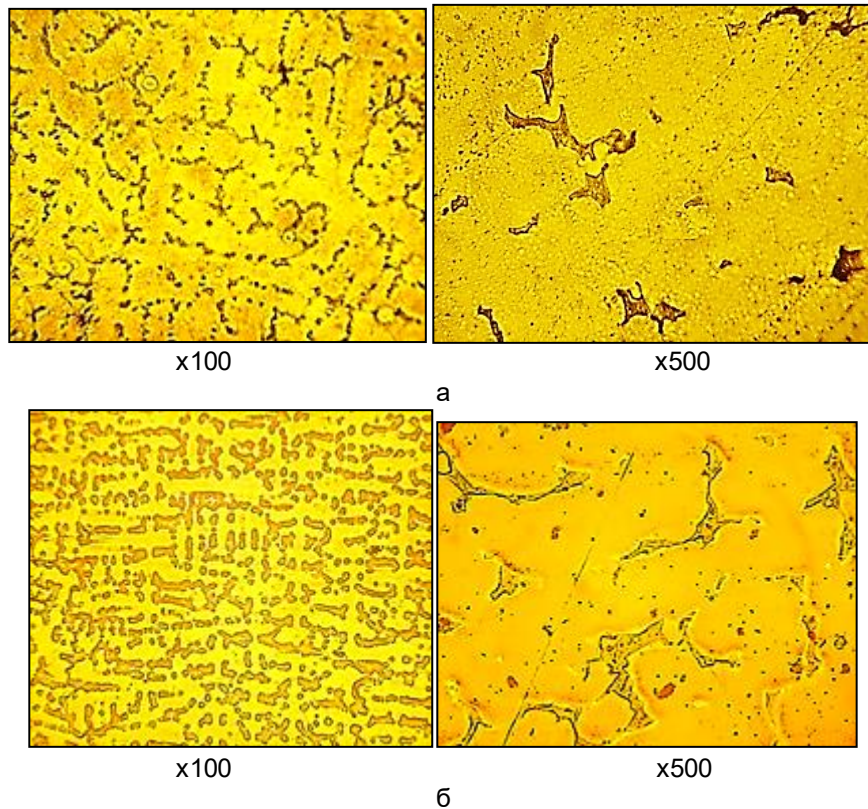


Рисунок 1 - Залежності механічних властивостей олов'яно-алюмінієвої бронзи від вмісту в ній домішок (Si, Fe, Zn, Pb)

Негативний вплив більшості досліджуваних домішок у бронзі БрОЗАЗ, особливо на характеристики ударної в'язкості, можна пояснити збільшенням частки хімічного з'єднання у якості другої структурної складової в бронзі БрОЗАЗ з різним вмістом домішок, що витікає з аналізу мікроструктур, представлених на рис. 2. Аналіз мікроструктури сплаву, що досліджується, свідчить про двофа-

зний його структурний стан в обох випадка (див. рис. 2, а та 2, б). Структурними складовими в обох випадках є α -Cu твердий розчин, який формує матрицю структури бронзи, та β -твердий розчин на основі електронної сполуки Cu_5Sn перитектичного генезису [17] з ОЦК решіткою просторової групи $Im\bar{3}m$ [18].



а – механічне приготування з хімічним травленням, б – електрополіровка

Рисунок 2 - Мікроструктура бронзи БрО3А3 з 3,75 % Sn, 3,78 % Al, 0,017 % Fe, Cu - залишок (а) та бронзи БрО3А3 з 3,70 % Sn; 3,71 % Al, 0,45 % Fe, 0,51 % Si, 0,48 % Zn, Cu - залишок (б)

Незважаючи на присутність у другому випадку додаткового експериментального введення у бронзу БрО3А3 домішок у кількості відповідно до таблиці 2, інтерметалідних сполучень ендогенного походження в структурі не виявлено (див. рис. 2 б). Натомість, мікроструктурними дослідженнями зафіксований факт збільшення кількості другої фази – β -Cu₅Sn з 17...20% (див. рис. 2 а) до 34...38% (див. рис. 2 б).

При цьому встановлено, що мікротвердість матриці (Н_μ) підвищилась з 1142...1364 МПа до 1617...1887 МПа. Це очевидно пов'язано з твер-

дорозчинним зміцненням α -фази. Мікротвердість перитектичної β -Cu₅Sn фази не змінилась і становила в обох випадках 4985...5275 МПа.

Слід зазначити, що підвищення ступеню легуваності α -Cu твердого розчину та збільшення частки хімічного з'єднання β -Cu₅Sn у якості другої структурної складової в бронзі БрО3А3 з різним вмістом домішок не тільки знижують рівень механічних властивостей бронзи, але і призводять до виникнення гарячих тріщин у виливках, про що, зокрема, свідчать зображення на рис. 3.

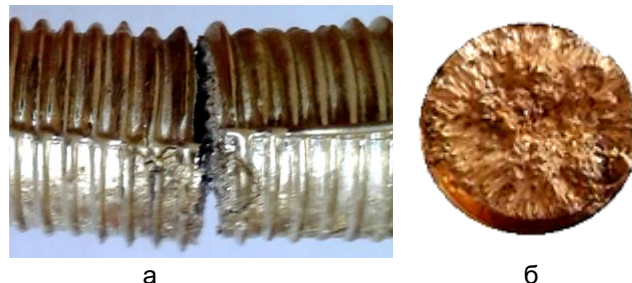


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд гарячої тріщини (а) та макроскопічна презентація поверхні руйнування по гарячій тріщині (б) в зразку

З метою встановлення впливу Sn та Al в межах від 3 до 4% (мас.), кожного, на механічні властивості бронзи за даними табл. 3 побудували залежності, що надані на рис. 4.

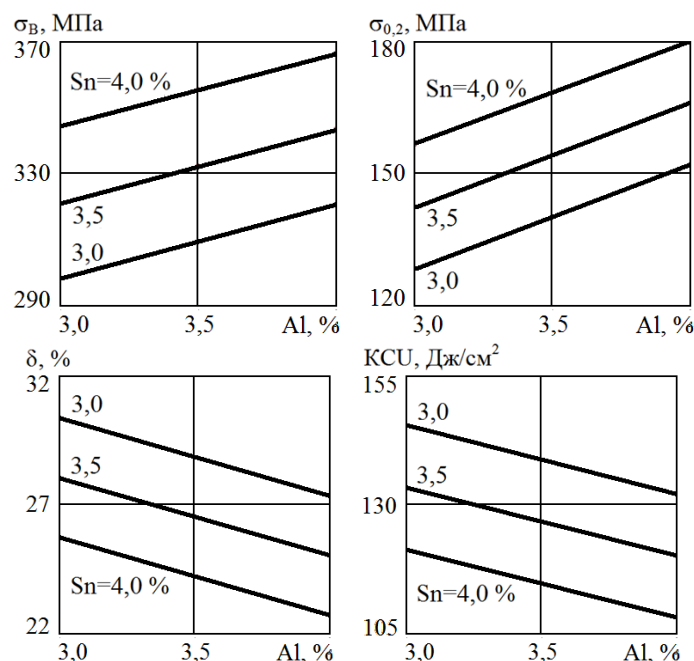


Рисунок 4 – Залежність тимчасового опору при статичному розтягуванні, межі плинності, ударної в'язкості та відносного подовження від вмісту в бронзі БрО3А3 алюмінію та олова

Аналіз ходу кривих на рис. 4 показує, що зі збільшенням вмісту алюмінію та олова в межах від 3 до 4 % (мас.) пластичні та в'язкі характеристики (величини δ_5 та КСУ) знижуються, а міцність (величини σ_B та $\sigma_{0,2}$) зростає.

Таким чином, отримані результати досліджень для бронзи БрО3А3 представимо в вигляді табл. 4.

Таблиця 4 – Вплив хімічних елементів-домішок на механічні, властивості бронзи БрО3А3

Властивості	Домішки			
	Fe	Si	Zn	Pb
Межа міцності при розтягуванні	+	–	–	–
Межа текучості	–	+	–	–
Відносне подовження	–	+	–	–
Межа міцності удару на вигин	–	+	–	–

Висновки. Встановлено, що з числа досліджених домішок в бронзах БрО3А3 вміст кремнію та заліза слід обмежити 0,2% (мас.) кожного. В той же час свинець та цинк в таких бронзах у будь якій кількості неприпустимі. При цьому, досліджені домішки значною мірою впливають практично на всі показники механічних властивостей окрім показника відносного подовження.

Вміст основних легуючих компонентів (олова, алюмінію) в бронзі БрО3А3 є вирішальним чинником. Зі збільшенням вмісту олова та алюмінію в межах від 3 до 4 % (мас.) пластичність та в'язкість (величини δ_5 та КСУ) знижуються, а міцність (величини σ_B та $\sigma_{0,2}$) зростає. Встановлену закономірність потрібно враховувати під час приготування даної марки бронзи для отримання виливків з заданим рівнем властивостей.

Бібліографічний опис

1. Комков В. Г., Стариенко В. А. Физико-механические свойства легированных меди и оловянной бронзы. *Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ»*. 2013, Том 4, № 4, С. 1322 – 132.
2. Влияние легирующих компонентов и примесей на свойства сплавов меди. URL: https://www.sinref.ru/000_uchebniki/03400metalurg/010_uvelirnoe_hudojestv_litio_po_modelam_splavov_medi_1991/015.htm
3. Живетьев А. С., Головкин Е. А., Лапоногова П. А. Влияние малых добавок лигатуры Al-Ti-B на механические и эксплуатационные свойства оловянной бронзы. *Инновационные технологии в литейном производстве*: материалы междунар. науч.-техн. конф. (г. Москва, 22–23 апреля 2019 г.). Москва, 2019. С. 202-205.
4. Колачев Б.Ф., Елагин В.И., Ливанов В.А.. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*: учебник для вузов. Изд. 4-е, испр. и доп. Москва: МИСИС, 2005. 432 с.
5. Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В. *Промышленные цветные металлы и сплавы*. 3-е изд. Москва: Металлургия, 1974, 488 с.
6. Бронзы оловянные литейные. URL: <https://on-v.com.ua/novosti/tehnologii-i-nauka/bronzy-olovnyanye-liteinye/>
7. Влияние химических элементов на свойства медных сплавов. URL: http://markmet.ru/tehnologiya_metallorv/vliyanie_khimicheskikh_elementov_na_svoystva_mednykh_splavov
8. Меркулова Г.А. *Металловедение и термическая обработка цветных сплавов: учеб. пособие*. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2008. 312 с.

9. Влияние примесей на алюминиевые бронзы. URL: https://cmtorg.ru/news/2011_02_15/
10. Свойства алюминиевых бронз. URL: <https://cvet-metall.com/articles/svoystva-alyuminievyyh-bronz/>
11. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди / Под ред. С.В. Шухардина. Москва: Наука, 1979. 249 с.
12. ISO 148-1:2016. Metallic materials. – Charpy pendulum impact test – Part 1: Test method. [Third edition 2016-10-15] 2016. 29 pp. (International standard).
13. ДСТУ ISO 6892-1:2019 Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (ISO 6892-1:2016, IDT). [Чинний від 2019-11-01]. Держспоживстандарт України, 2019. 40 с.
14. ASTM E3 - 11(2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. URL : <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astme311>.
15. Попилов Л.П. Электрополирование и электротравление металлографических шлифов / Л.П. Попилов, Л.П. Зайцева – Москва : Металлургиздат, 1963. 410 с.
16. Шипачёв В.С. Высшая математика: учебник для вузов. Москва : Высшая школа. 1998. 479 с.
17. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди : справочник / под ред. М.Е. Дрица. Москва : Наука. 1979. 246 с.
18. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник в 3-х томах. Москва : Машиностроение, 1996..2000

References

1. Komkov V. G., Starienko V. A. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva legirovannykh medi i olovyannoj bronzy* [Physico-mechanical properties of alloyed copper and tin bronze]. *Elektronnoe nauchnoe izdanie «Uchenye zametki TOGU»* [Electronic scientific publication "Scientific notes of POSU"]. 2013, Tom 4, № 4, P. 1322 – 132.
2. *Vliyanie legiruyushchikh komponentov i primesei na svoystva splavov medi* [Influence of alloying components and impurities on the properties of copper alloys]. URL: https://www.sinref.ru/000_uchebniki/03400metallurg/010_uvelirnoe_hudojstv_litio_po_modelam_splavov_medi_1991/015.htm.
3. Zhivetev A. S., Golovko E. A., Laponogova P. A. *Vliyanie mal'kh dobavok ligatury Al-Ti-B na mekhanicheskie i ekspluatatsionnye svoystva olovyannoj bronzy* [Influence of small additions of Al-Ti-B master alloy on the mechanical and operational properties of tin bronze]. *Innovatsionnye tekhnologii v litejnom proizvodstve : materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Innovative technologies in foundry production: materials of the international sci.-tech. conf.]*. (g. Moskva, 22–23 aprelya 2019 g.). Moskva, 2019. P. 202-205.
4. Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka cvetnykh metallov i splavov: uchebnyk dlya vuzov* [Metal science and heat treatment of non-ferrous metals and alloys: a textbook for universities]. Moskva : MISIS, 2005. 432 p.
5. 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.
6. *Bronzy olovyanne litejnye* [Tin foundry bronzes] URL: <https://on-v.com.ua/novosti/tehnologii-i-nauka/bronzy-olovyanne-litejnye/>
7. *Vliyanie himicheskikh elementov na svoystva mednykh splavov* [The influence of chemical elements on the properties of copper alloys]. URL: http://markmet.ru/tehnologiya_metallov/Vliyanie-khimicheskikh-elementov-na-svoystva-mednykh-splavov
8. 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.
9. *Vliyanie primesei na alyuminievyye bronzy* [Influence of impurities on aluminum bronzes]. URL: https://cmtorg.ru/news/2011_02_15/
10. *Svoystva alyuminievyyh bronzy* [Properties of aluminum bronzes]. URL: <https://cvet-metall.com/articles/svoystva-alyuminievyyh-bronz/>
11. *Dvoynye i mnogokomponentnyye sistemy na osnove medi* [Dual and multi-component systems based on copper] / Pod red. S.V. SHuhardina. Moskva: Nauka, 1979. 249 p.
12. ISO 148-1:2016. Metallic materials. – Charpy pendulum impact test – Part 1: Test method. [Third edition 2016-10-15] 2016. 29 pp. (International standard).
13. DSTU ISO 6892-1:2019 *Metalevi materiali. Viprobuvannya na roztyag. Chastina 1. Metod viprobuvannya za kimnatnoyi temperaturi* [Metallic materials. Tensile tests. Part 1. Test method at room temperature] (ISO 6892-1:2016, IDT). [Chinnij vid 2019-11-01]. Derzhspozhivstandart Ukraïni, 2019. 40 p.
14. ASTM E3 - 11(2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. URL : <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astme311>.
15. Popilov L.P., Zajceva L.P. *Elektropolirovanie i elektrotравление металлографических шлифов* [Electropolishing and electroetching of metallographic sections]. Moskva : Metallurgizdat, 1963. 410 p.
16. Shipachyov V.S. *Vyshshaya matematika: uchenik dlya vuzov* [Higher Mathematics: Student for Universities]. Moskva : Vysshaya shkola. 1998. 479 p.
17. *Dvoynye i mnogokomponentnyye sistemy na osnove medi: Spravochnik* [Dual and multi-component systems based on copper: a guide]. / pod red. M.E. Drica. Moskva : Nauka. 1979. 246 p.
18. Lyakishev N.P. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem: Spravochnik v 3-h tomah* [Diagrams of the state of binary metal systems: a reference book in 3 volumes]. Moskva : Mashinostroenie, 1996..2000